

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет Інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра Автоматики та управління в технічних системах

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Ролік О.І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2018р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації): 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом

Виконав: студент 6 курсу, групи ІА-73мп
(шифр групи)

Нагайко Дмитро Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Репнікова Н. Б., доцент кафедри. АУТС, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Рецензент Жданова О. Г., доцент кафедри АСОІУ, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет _____ Інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра _____ Автоматики та управління в технічних системах

Ступінь вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність _____ 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

Ролік О.І.

(ініціали, прізвище)

« » _____ 2018р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Нагайку Дмитру Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: _____ Система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом

Науковий керівник дисертації: _____ Репнікова Наталія Борисівна, доцент, к.т.н

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 29 жовтня 2018р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації: _____ 4 грудня 2018р.

3. Об'єкт дослідження: _____ безпілотний літальний апарат.

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): _____ система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом, вага апарату – 1,44 кг, максимальна швидкість набору висоти – 5 м/с, максимальна швидкість спуску 3 м/с, максимальна швидкість польоту – 16 м/с, перерегулювання системи – нульове, стала помилка системи – нульова.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: _____ огляд предметної області та аналіз існуючих моделей безпілотних літальних апаратів, розроблення схеми структурної та схеми функціональної, побудова алгоритмів функціонування літального апарату.

виведення математичної моделі, дослідження якісних характеристик системи, розроблення регулятора, розроблення стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: схема структурна, схема функціональна, схеми алгоритмів роботи безпілотного літального апарату, синтез систем керування літальним апаратом, дослідження показників якості та стійкості систем.

7. Орієнтовний перелік публікацій: «Удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для синтезу складних систем».

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 29 жовтня 2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Видача завдання та узгодження вихідних даних	29.10.17 – 02.11.18	
2	Аналіз існуючих рішень	03.11.18 – 05.11.18	
3	Розробка схеми електричної структурної	06.11.18 – 10.11.18	
4	Розробка схеми електричної функціональної	11.11.18 – 15.11.18	
5	Розробка математичної моделі	15.11.18 – 18.11.18	
6	Синтез регулятора	18.11.18 – 22.11.18	
7	Розробка стартап-проекту	23.11.18 – 27.11.18	
8	Оформлення пояснювальної записки	28.11.18 – 30.11.18	
9	Оформлення графічних матеріалів	01.12.18 – 03.12.18	
10	Подання дипломного проекту до попереднього захисту	04.12.18	

Студент

(підпис)

Нагайко Д. Ю.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Репнікова Н. Б.
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою інтегровані інформаційні системи підготовки рівня «магістр» на тему «Система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом». 134 сторінок, 48 рисунків, 46 таблиць, 14 додатків, 64 джерел за переліком посилань.

В роботі спроектовано систему керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом, вирішено задачу підвищення ефективності регулювання положенням дрону за допомогою модифікованого модального регулятора та цифрового ПД-регулятора, проведено математичне моделювання об'єкта управління, розроблено структурну та функціональну схеми системи, робота системи описана у вигляді алгоритмів.

Значну увагу в магістерській дисертації приділено дослідженню синтезу складних систем з використанням ПД-регуляторів. При цьому було виведено удосконалену формулу розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора для складних цифрових систем. Отримана формула була застосована для синтезу системи керування висотою літального апарату. Результати дослідження були підтверджені за допомогою моделювання в графічному середовищі MATLAB/Simulink.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, система керування, стійкість системи, якість системи, перехідна функція, перехідний процес, модальний регулятор, ПД-регулятор.

ABSTRACT

Master's dissertation on the educational-professional level training program "Master" on the theme "Alternative home power supply system". 134 pages, 48 figures, 46 tables, 14 applications, 64 sources.

In the paper the system of control of the search and rescue unmanned aerial vehicle was designed, the task of increasing the efficiency of regulation of the position of the drone with the help of the modified modal controller and the digital PD controller was solved, the mathematical modeling of the control object was made, the structural and functional schemes of the system were developed, the system work is described by the algorithms.

Considerable attention in the master's dissertation is paid to the study of the synthesis of complex systems using PD controllers. This resulted in an improved formula for calculating the coefficients of the PD regulator for complex digital systems. The obtained formula was used for the synthesis of the control system for the height of the aircraft. The results of the study were confirmed by modeling in the MATLAB/Simulink graphical environment.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control system, system stability, system quality, transient function, transient process, modal controller, PD controller.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	13
1.1 Основні поняття та визначення	13
1.2 Опис конструктивних схем	14
1.3 Опис систем керування.....	17
1.4 Огляд існуючих рішень	21
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА	30
3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА.....	34
3.1 Польотний контролер	34
3.2 Комунікація.....	35
3.3 Автоматична посадка.....	36
3.4 Координація	36
3.5 Відео-трансляція.....	37
4 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА	39
4.1 Алгоритм автоматичного зльоту БПЛА	39
4.2 Алгоритм автоматичної посадки БПЛА	41
4.3 Алгоритм автономного польоту БПЛА	43
4.4 Алгоритм патрулювання БПЛА.....	46
5 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА.....	49
5.1 Постановка задачі.....	49
5.2 Математична модель БПЛА.....	49
5.3 Лінеаризація системи.....	63
5.4 Моделювання системи БПЛА.....	66

6 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB	70
6.1 Передавальна функція системи керування БПЛА в цифровому вигляді	70
6.2 Аналіз стійкості цифрової САУ	73
6.3 Моделювання цифрової системи в пакеті прикладних програм MATLAB	77
6.4 Аналіз якості цифрової системи	79
7 РОЗРОБЛЕННЯ РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО- РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА	83
7.1 Синтез модального регулятора для систем керування кутами БПЛА.....	83
7.2 Синтез модифікованого модального регулятора для систем керування кутами БПЛА	91
7.3 Синтез цифрового ПД-регулятора для систем керування висотою БПЛА.	97
8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	104
8.1 Вступ.....	104
8.2 Опис ідеї стартап-проекту	104
8.3 Технологічний аудит проекту	107
8.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту	107
8.5 Розроблення ринкової стратегії проекту	117
8.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	120
8.7 Висновки	124
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	128
ДОДАТОК А.....	135
ДОДАТОК Б.....	139
ДОДАТОК В	140
ДОДАТОК Г.....	141
ДОДАТОК Д.....	142
ДОДАТОК Е	144
ДОДАТОК Є	146
ДОДАТОК Ж.....	147
ДОДАТОК З.....	150

ДОДАТОК И.....	153
ДОДАТОК І.....	154
ДОДАТОК Ї.....	155
ДОДАТОК К.....	156
ДОДАТОК Л.....	157

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ДПЛА – дистанційно-пілотований апарат

БПАЛА – безпілотний автоматичний літальний апарат

ДКЛА – дистанційно-керований літальний апарат

ESC – electric speed controller (електричний регулятор швидкості)

ПЗ – програмне забезпечення

GCS – ground control station (наземна станція керування)

GPS – global positioning system (глобальна система позиціонування)

ГЛОНАСС – глобальна навігаційна супутникова система

САУ – система автоматичного управління

ВСТУП

Останнім часом розвиток мобільних роботів набув швидкого темпу, особливо популярним стало застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в різних сферах людської діяльності. В першу чергу це пов'язано з перевагами, якими володіє дрон. Завдяки невеликим розмірам, надійній конструкції, компактності, маневреності, простоті управління, маючи малу вагу при значній масі корисного навантаження, безпілотні літальні апарати здатні виконувати широкий спектр задач. Вони успішно використовуються для аерофотозйомки та картографування, оперативного прогнозування та оцінки наслідків надзвичайних ситуацій, моніторингу об'єктів промисловості та природних комплексів, доставки товарів, у розважальних цілях тощо.

Застосування безпілотних літальних апаратів у пошуко-рятувальних операціях відносно новий напрямок, що стрімко розвивається. Серед основних причин та переваг використання дронів для таких цілей:

- висока оперативність, що особливо важливо в надзвичайних ситуаціях;
- надійність, оскільки відсутній людський фактор;
- відсутність або суттєве зниження загрози для життя та здоров'я персоналу;
- економічна ефективність завдяки відносній дешевизні дрона;
- візуальний моніторинг в режимі реального часу із забезпеченням високої якості зображень;
- швидкий пошук з ідентифікацією цілі;
- використання термографії, нічного бачення та голосового сповіщення;
- можливість застосування груп дронів для реалізації більш складних функцій в умовах надзвичайної ситуації.

Однак потенціал використання безпілотних літальних апаратів обмежений тим, що на сьогоднішній день керування польотом дрону здійснюється в напіваавтоматичному режимі по командам оператора, або в дистанційному режимі з використанням пульта керування.

Актуальність роботи. Для виконання задач моніторингу місцевості з паралельним пошуком визначених цілей система керування безпілотним літальним апаратом повинна реалізовувати наступні функції:

- автоматичний зліт та посадка;
- автономний політ по заданій траєкторії, тобто програмне керування;
- стабілізація положення в просторі при зовнішньому збуренні (сильні повітряні потоки, зміщення центру мас квадрокоптера, пов'язане з присутністю фото та відео апаратури на борту, тощо);
- високою маневреністю, бистродія та точність руху по траєкторіям;
- розпізнання визначених об'єктів з максимальною точністю при різних умовах навколишнього середовища;
- передача чіткого зображення в режимі реального часу;
- планування маршруту з уникненням статичних та динамічних перешкод.

Неповна комплектація і(або) відповідність встановленим вимогам сучасних безпілотних літальних апаратів не надає максимальної ефективності та успішності при виконанні широких задач патрулювання навколишнього середовища в надзвичайних ситуацій. Тому дослідження в напрямку покращення керування безпілотними літальними апаратами націленими на пошуково-рятувальні операції є актуальними і мають важливе практичне значення.

Метою магістерської дисертації є забезпечення ефективного керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом у просторі, що дозволить з більшою точністю переміщатися визначеним маршрутом та підвищить стабільність польоту. Для досягнення мети були поставлені наступні **задачі**:

- огляд предметної області та аналіз існуючих рішень;
- розроблення структурної схеми системи керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом;
- розроблення функціональної схеми системи керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом;
- розроблення алгоритмів керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом;

- виведення математичної моделі системи керування безпілотним літальним апаратом;
- моделювання системи керування безпілотним літальним апаратом в пакеті прикладних програм MATLAB;
- аналіз показників стійкості та якості змодельованої системи керування безпілотним літальним апаратом;
- виведення удосконаленої формули розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора для складних цифрових систем;
- синтез системи керування кутами безпілотного літального апарату з допомогою модального регулятора;
- синтез системи керування висотою безпілотного літального апарату з допомогою цифрового ПД-регулятора з використанням удосконаленої формули розрахунку коефіцієнтів.

Об'єктом дослідження є безпілотний літальний апарат.

Предметом дослідження є система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися методи математичного аналізу та моделювання, синтезу модальних регуляторів та ПД-регуляторів для складних цифрових систем. Для математичних розрахунків застосовувався пакет прикладних програм MATLAB, моделювання систем виконувалося в графічному середовищі MATLAB/Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів. До числа нових наукових результатів, отриманих в дисертації, відноситься удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора для складних цифрових систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропонована система керування пошуково-рятувальним БПЛА дозволяє підвищити ефективність керування положенням дрону та його стабілізацію в польоті;
- запропоновано удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора для складних цифрових систем.

Апробація результатів дисертації. Результати проведених у магістерській дисертації досліджень були оприлюднені на науково-професійній конференції «Summer InfoCom Advanced Solutions 2018».

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Основні поняття та визначення

На сьогоднішній день поняття «безпілотний літальний апарат (БПЛА)» має велику кількість визначень та синонімів, наприклад, таких як «безпілотник», «дрон» чи «мультикоптер». Одне з найпопулярніших та найпростіших визначень БПЛА – «Безпілотний літальний апарат – це літальний апарат без людини (екіпажу) на борту» [1]. Проте воно є надто узагальненим і не завжди точно відображає специфіку літального апарату. Тому більш точно та чітко БПЛА можна описати на основі визначення «безпілотного мобільного засобу»: «Безпілотний літальний апарат – це літальний апарат багаторазового або умовно-багаторазового використання без екіпажу на борту (людини-пілота), який здатний самостійно та цілеспрямовано переміщатись в повітрі для виконання різних функцій в автономному режимі (за допомогою виконавчої програми) або з допомогою дистанційного керування (що здійснюється людиною-оператором із стаціонарного або мобільного пульта керування) [2, 3]. Таким чином до БПЛА не відносяться безпілотні модифікації серійних літаків, які виростовуються як повітряні мішені, а також всі види балістичних і крилатих ракет.

За загальним призначенням безпілотні літальні апарати діляться на три групи [4]:

- дистанційно-пілотований літальний апарат (ДПЛА) – безпілотний літальний апарат з безперервним управлінням, яке здійснюється тим або іншим способом з нерухомої або рухомої станції управління;
- безпілотний автоматичний літальний апарат (БПАЛА) – безпілотний літальний апарат, що реалізовує своє функціональне призначення в автоматичному режимі відповідно до закладених у нього алгоритмів і програм функціонування;
- дистанційно-керований літальний апарат (ДКЛА) – безпілотний літальний апарат, що реалізовує своє функціональне призначення в основному автономно, при епізодичному втручанні оператора управління для перенацілювання або перепрограмування системи керування літальним апаратом.

В даній магістрескій дисертації розглядається малогабартиний дистанційно-керований літальний апарат, оскільки лише цей тип якісно задовільняє вимогам, що сформовані до системи керування пошуково-рятувальним БПЛА.

1.2 Опис конструктивних схем

Поява в вісімдесяті роки безколекторних електродвигунів і відповідних схем управління вирішили проблему складної трансмісії, що передавала обертання одного мотора на кілька гвинтів та перешкоджала розробленню багатогвинтових гелікоптерів. Створюючи розподілену систему керування індивідуальних електроприводів, встановлених на кожному гвинті, вдалося створити малогабаритні БПЛА з цілком конкурентними характеристиками.

Дрони можна класифікувати за багатьма критеріями, основними з яких є кількість двигунів та їх розташування. Основні типи дронів за кількістю двигунів можна розбити на три групи. Перша з них – це трикоптери (рисунок 1.1). Трикоптери – безпілотні літальні апарати з трьома гвинтами-двигунами. Головний недолік такої системи полягає в поганій маневреності при виконанні повороту. Тому даний тип дронів використовується останнім часом все рідше. Величина корисного навантаження такої конструкції вкрай мала.

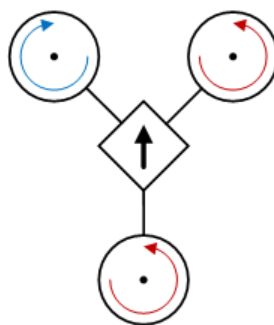


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема трикоптера

До другої групи відносяться квадрокоптери – це найбільш поширені і розвинені конструкції літальних апаратів, що мають чотири двигуна. Головним недоліком літальних апаратів цієї групи є невисока відмовостійкість, у разі втрати одного з

двигунів, квадрокоптер втрачає рівновагу та падає. При установці потужних двигунів можна переносити корисне навантаження до 5 кг.

В залежності від розташування двигунів квадрокоптери можна розділити на три типи (рисунок 1.2):

- «конфігурація +» – по одному двигуну спереду, ззаду та з боків;
- «конфігурація X» – половина двигунів знаходяться спереду, інша половина – ззаду;
- «конфігурація Y» – три двигуни розташовуються аналогічно з трикоптером, четвертий знаходиться над чи під одним із інших.

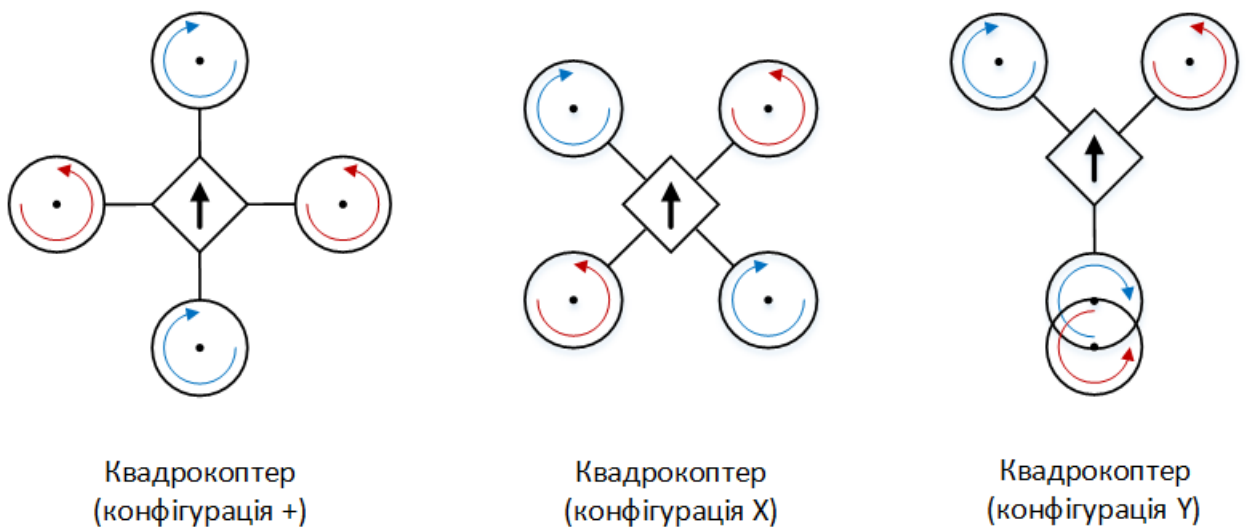


Рисунок 1.2 – Різновиди конструктивних схем квадрокоптера

Третя група – це гексокоптери та октокоптери, даний тип дронів відноситься до тяжких апаратів, які здатні переносити вантажі до 20 кг. Ці апарати мають складну конструкцію та потребують спеціальної установки і програмування польотного контролера. Дрони цієї групи мають високу відмовостійкість, оскільки при виході з ладу одного з двигунів дрон може летіти на останніх. В залежності від розташування двигунів гексокоптер можна розділити на три типи (рисунок 1.2):

- «стандарний» – двигуни розташовуються у формі зірочки;
- «конфігурація H» – половина двигунів знаходяться зліва, інша половина – справа;

– «конфігурація Y» – двигуни розташовуються парами аналогічно з трикоптером.

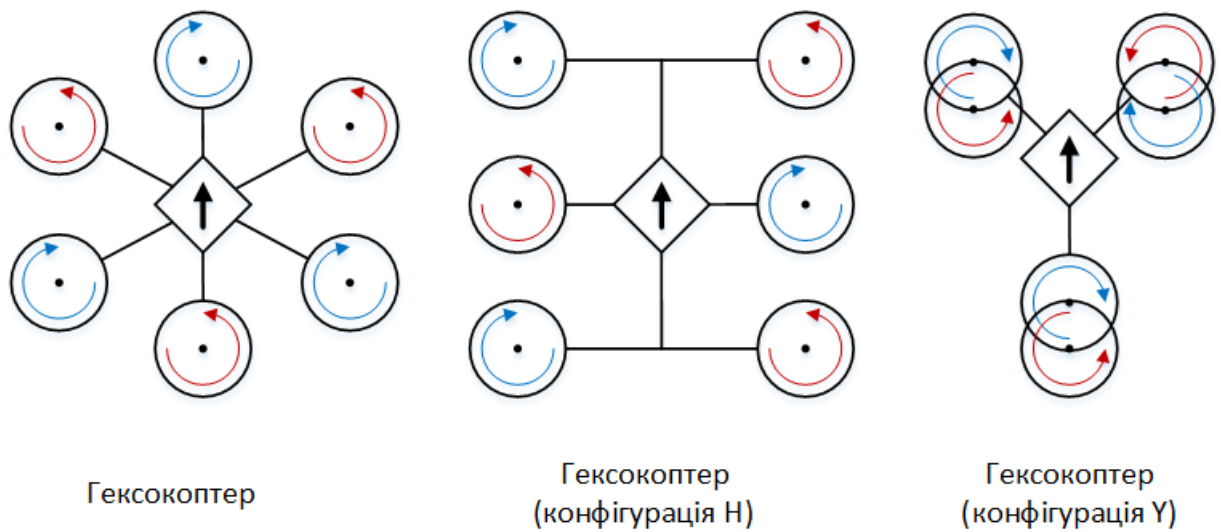


Рисунок 1.3 – Різновиди конструктивних гексокоптера

Таким чином, найбільшого поширення набули дрони, що мають парне число (4, 6 або 8) гвинтів постійного кроку. Кожен гвинт приводиться в рух власним двигуном. Половина гвинтів обертається за годинниковою стрілкою, інша половина – проти, тому хвостовий гвинт не потрібен. Апарат маневрує, змінюючи швидкість обертання гвинтів.

Управління рухом дрона здійснюється за наступними алгоритмами. Якщо необхідно здійснити підйом, то необхідно прискорити обертання всіх гвинтів за рахунок збільшення величини керуючої напруги, що надходить на двигуни. Для руху в ту чи іншу сторону, потрібно прискорити обертання гвинтів з одного боку і уповільнити з іншого. Для отримання повороту потрібно прискорити обертання гвинтів, що обертаються за годинниковою стрілкою, і уповільнити ті, що обертаються проти (або навпаки). Робота двигунів при управлінні рухом БПЛА на прикладі квадрокоптера зображена на рисунку 1.4. Управління двигунами виконується за допомогою мікропроцесора, в якому запрограмовані вищеописані режими руху БПЛА. Для забезпечення сталого керування дрон оснащений гіроскопами, бародатчиками, акселерометрами, магнітометрами тощо [4-8].

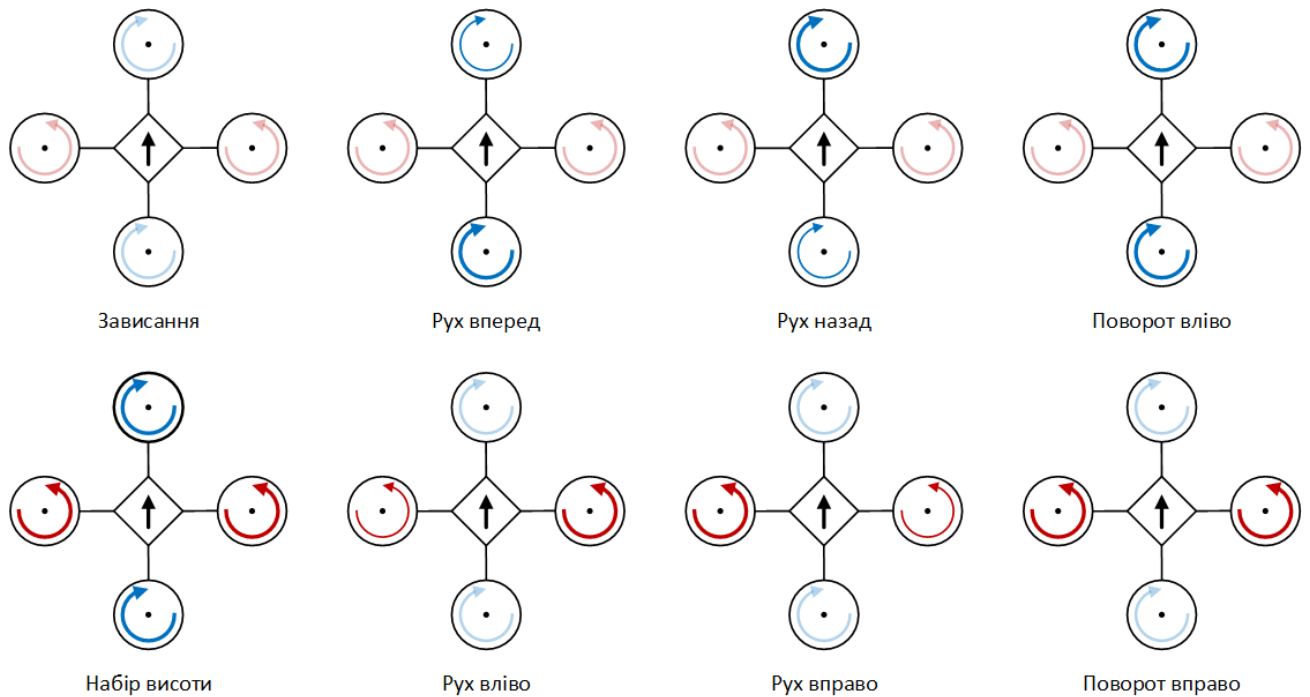


Рисунок 1.4 – Робота двигунів при управлінні рухом квадрокоптера

Для подальшого дослідження був обраний дрон з чотирма двигунами, оскільки його конфігурації достатньо для поставлених цілей: він має менший розмір порівняно з гексокоптером чи октокоптером; корисне навантаження, яке він може переносити достане для утримання відеоапаратури на борту; він відносно дешевий, що має значення при патрулюванні місцевостей в надзвичайних ситуаціях.

1.3 Опис систем керування

Аналіз літературних джерел показує, що на сьогоднішній день в основному застосовуються БПЛА з дистанційним пілотування. Використання таких літальних апаратів має ряд особливостей, пов'язаних з постійним стеженням оператора за станом дрона в просторі, передбаченням можливостей зіткнень з перешкодами і своєчасною подачею керуючих сигналів на приводи відповідних гвинтів. Це вимагає відповідної кваліфікації від оператора. Такий підхід має істотні недоліки:

- обмежена область застосування літальних апаратів, викликана необхідністю підтримки зв'язку з постом оператора;

- складність управління спричинена прямою залежністю між дією оператора та рухом дрона, що приводить до швидкої втоми оператора;
- складність вироблення адекватного управління на основі телеметричних даних.

Більш перспективним є система керування БПЛА із застосуванням автономних пристроїв навігації та визначення перешкод. Завдяки чому дрон може переміщатися в просторі самостійно, незалежно від дій оператора.

Режим автономного польоту дрону складається з декількох основних етапів, які виконуються під дією керуючих впливів, що надходять від бортової САУ:

1. зліт з деякої поверхні;
2. переміщення БПЛА в горизонтальній площині в задану точку простору;
3. перехід в режим зависання, що дозволяє здійснювати розвідку місцевості, відеозйомку та (або) виконувати необхідні вимірювання;
4. повернення у вихідну або будь-яку іншу задану точку та посадка.

Очевидно, що при проектуванні бортової системи автоматичного управління автономним польотом, необхідно вирішити завдання визначення реальних координат дрону шляхом обробки даних, що надходять з датчиків, узгодження їх із заданими в пам'яті, знаходження керуючих впливів за відхиленнями реальних координат від заданих.

Особливий інтерес представляє режим стабілізації БПЛА, що характеризується здатністю дрона зависати в повітрі на заданій висоті і робити моніторинг навколишнього середовища. Такий режим зручно здійснювати автономно за допомогою бортової САУ дрона. Для цієї функції в системі управління польотного контролера становлюються акселерометр, гіроском та барометр. У той же час сьогодні навіть кращі моделі дронів мають невисоку точність зависання на точці. Відхилення по висоті досягає ± 0.5 м; а в горизонтальній площині ± 1.5 м. Розробка нових алгоритмів автономного управління дозволяє вирішити поставлену задачу більш якісно.

Останнім часом все більшого поширення набувають методи інтелектуального управління БПЛА. Проте на сьогоднішній день в більшості випадків реалізація такого

управління в недетермінованих умовах має недолік, який пов'язаний з недостатньою здатністю інтелектуальних систем управління до адаптації в динамічних умовах. Самостійне функціонування дрону в заздалегідь непередбачуваних умовах можливо при подальшому розвитку інтелектуальних систем управління. У цьому випадку управління з боку оператора може здійснюватися на більш високому рівні – на рівні постановки мети. Однак такі методи управління рухом БПЛА розвинені слабо.

Літальний апарат, керування яким виконується на рівні постановки мети, повинен здійснювати рух в недетермінованій середовищі, яке характеризується заздалегідь невідомим розташуванням перешкод і цільових об'єктів, а також їх рухливістю. В таких умовах самостійне переміщення робота визначає необхідність динамічного аналізу ситуації в середовищі функціонування. На основі результатів такого аналізу, здійснюваного в загальному випадку за допомогою сенсорної інформації і цільової установки оператора, система управління БПЛА повинна здійснювати навігацію і управління його рухом.

Відповідно до цього виділяють три типи архітектур систем управління рухом безпілотного літального апарату:

1. архітектура на основі декомпозиції функцій обробки інформації в процесі «розпізнавання – моделювання – планування – дія» (Sensor – Model – Plan – Act, SMPA);
2. реактивна (рефлексна) архітектура, основана на стратегії цілеспрямованої поведінки БПЛА, що виробляється на базі сенсорної інформації (sensor based action);
3. гібридна архітектура на основі комбінування двох попередніх типів архітектур.

Типова структурно-функціональна схема SMPA-системи управління рухом дроном, представлена на рисунку 1.5.

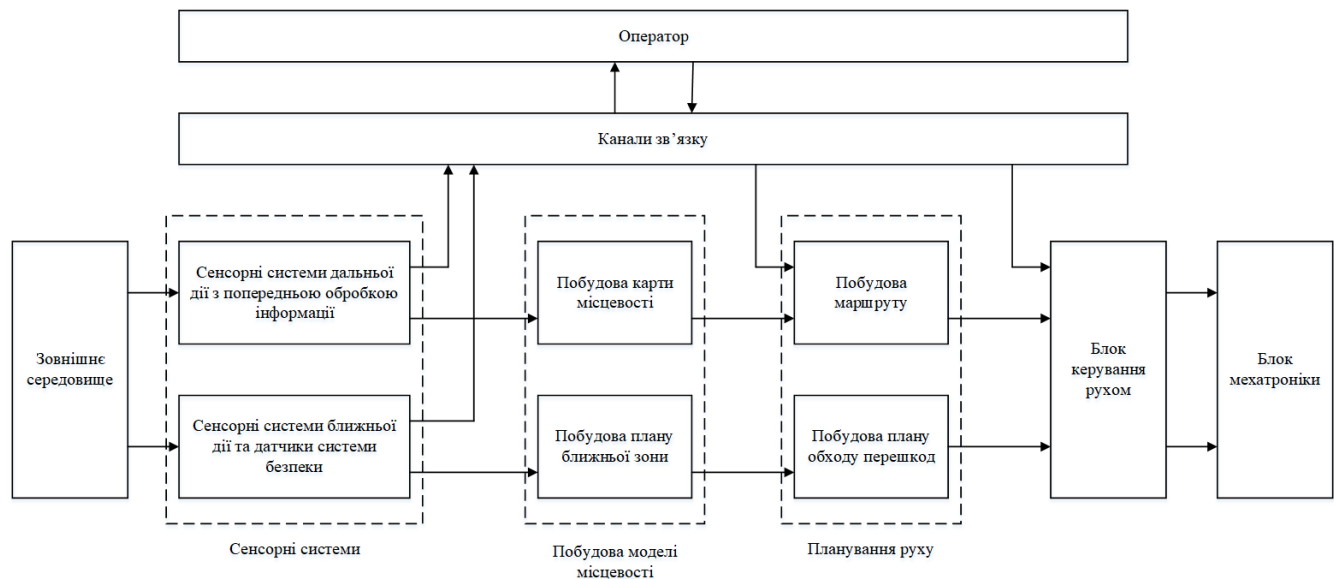


Рисунок 1.5 – Типова структурно-функціональна схема SMPA-системи управління рухом безпілотним літальним апаратом

Така система здійснює управління рухом дрона за допомогою моделювання навколишнього середовища, локалізації в ній, а також планування, корекції і відпрацювання траєкторій.

Моделювання довкілля здійснюється на базі сенсорної та іншої інформації, що надходить з різних джерел. Модель навколишнього середовища повинна описувати в динаміці розташування дрона, перешкод і цільових об'єктів.

Задача самолокалізації БПЛА тісно пов'язана із задачею моделювання робочого простору, оскільки їх рішення взаємно залежні, тобто якість рішення однієї визначає якість рішення іншої. Для вирішення цього завдання застосовуються методи числення шляху, інтегральної і сенсорної локалізації. Метод числення шляху передбачає здійснення аналізу накопиченої помилки і в більшості випадків використовується спільно з сенсорним методом для її усунення, а також приведення у відповідність характеристик або орієнтирів в робочому середовищі. Метод інтегральної навігації передбачає реалізацію глобального позиціонування (GPS) та лазерного сканування середовища. При моделюванні робочого простору БПЛА виділяють геометричну і топологічну локалізацію. Геометрична локалізація визначає положення і орієнтацію дрона, топологічна – його відношення з середовищем функціонування [9-14].

На сьогоднішній день існує три основні стратегії локалізаційного обчислень:

1. періодичне поєднання локальної моделі середовища із заданою апріорі картою;
2. визначення позиції на підставі апріорі відомих реперів-орієнтирів;
3. виділення характеристик середовища та оцінка їх позицій відносно дрону з наступним визначенням його результуючого переміщення.

Планування траєкторій БПЛА може здійснюватися на основі наступних підходів:

1. методи на основі карти шляхів, де застосовуються графи видимості і діаграми Вороного;
2. представлення карти середовища у вигляді поля в клітинку, яке передбачає реалізацію тріангуляції Делоне, а також розбиття на квадратні і шестикутні сегменти, на яких можуть бути реалізовані моделі імовірнісного проходження, моделі з накопиченням інформації і т. п.;
3. рух в віртуальних інформаційних полях, який передбачає використання евристичних алгоритмів, а також алгоритмів, заснованих на методі потенціалів;
4. методи планування поведінки руху, де сформований план являє собою послідовність поведінкових актів, перехід між якими здійснюється при настанні певних умов.

У загальному випадку виділяють глобальне і локальне планування. Глобальне планування здійснюється на основі карти місцевості (наприклад, з використанням GPS, сенсорних систем дальньої дії), локальне – на основі сигналів від сенсорних систем ближньої дії і датчиків безпеки, що надходять в реальному масштабі часу.

1.4 Огляд сучасних моделей БПЛА

За останній час кількість моделей дронів та їх різновид стрімко зріс, що спричинено різним призначенням та використанням БПЛА. На порталі Geeksus було

опубліковано рейтинг кращих моделей квалдрокоптерів з камерою за 2018 рік [15].

До списку увійшли наступні моделі:

- Parrot Bebop Drone 2;
- Xiro XPLOER V;
- Autel Robotics X-Star Premium;
- Xiaomi Mi Drone 4K;
- YUNEEC Typhoon Q500 4K;
- DJI Phantom 3 SE;
- DJI Spark;
- DJI Mavic Air;
- DJI Mavic Pro;
- YUNEEC Typhoon H.

Далі коротко описані головні особливості кожного дрону, їх плюси та мінуси, після чого сформовано порівняльну характеристику всіх моделей у вигляді таблиці (таблиця 1.1), кожний пункт порівняння оцінювався кількістю балів від 1 до 10.

1.4.1 Parrot Bebop Drone 2

Легкий дрон французької компанії Parrot SA вагою 500 г з керування зі смартфона та вбудованою камерою. Потужні двигуни розганяють апарат до 65 км/год і забезпечують маневреність. Дальність зв'язку – 100 м, яку можна збільшити до 2 км за допомогою додаткової апаратур. Батарея 2700 мА · год забезпечує до 25 хвилин в повітрі. Унікальна особливість апарату полягає в умінні здійснювати акрабатичні прийоми в повітрі. Оптика не має підвісу, зображення стабілізується програмно, зйомка відео в 1080p/30 на внутрішню пам'ять (8 Гб). Якість картини – середнє, недостатньо різкості, матриця шумить при слабкому світлі [16].

Автоматичні режими: зліт і посадка; повернення на місце; чотири види зйомки; політ по точкам (за додатковому плату).

Переваги: малий розмір, висока швидкість і маневреність; велика кількість режимів польоту; стійкий до пошкоджень.

Недоліки: мало внутрішньої пам'яті – 8 Гб, немає SD-карти; висока ціна за іграшку; платні доповнення; зйомки середньої якості, FHD без стабілізації.

1.4.2 Xiro XPLOER V

Дрон від компанії Shenzhen Zero UAV з вагою 1,3 кг та батареєю 5200 мА · ч, що дає до 25 хвилин польоту на відстань, що не перевищує 200 метрів. Літальний апарат повільно реагує на команди, не підтримує різкі повороти. Комплектна камера з 14 МП матрицею Panasonic кріпиться на трьохосовий підвіс, відеореєстратор з роздільною здатністю 1080p/30 без різких зрушень. Є можливість налаштування експозиції, ISO і балансу білого (пресети) з мобільного пристрою, файли зберігаються на карту пам'яті [17].

Автоматичні режими: зліт і посадка; повернення на місце; політ по точкам та навколо оператора.

Переваги: незвичайний дизайн; хороша комплектація з можливістю апгрейду; стабілізована камера з матрицею Panasonic; невисока ціна за наявні функції.

Недоліки: нестійкий бездротовий зв'язок пульта зі смартфоном; мала дальність і висота польоту; на пульті можна закріпити лише великий смартфон; помилки програмного забезпечення.

1.4.3 Autel Robotics X-Star Premium

Яскравий дрон від американської команди Autel Robotics має великий монолітний корпус вагою 1,6 кг та батареєю 4900 мА · год, якої вистачає приблизно на 20 хвилин польоту на дальність до 2 км, швидкість – середня, до 56 км/год. Апаратура з ЖК-екраном відображає ключові дані, є можливість закріпити мобільний пристрій до 10 дюймів. Камера Sony на 12 МП на кардановому підвісі оснащена

ширококутним об'єктивом 108 градусів, знімає ролики 4K/30 без зміщень, експозиція і витримка виставляється прямо з пульта [18].

Автоматичні режими: зліт і посадка; обліт точки; відвідування геопозиції; політ за пультом.

Переваги: міцний яскравий корпус дизайну; стабільна зйомка відео в 4K з ручними настройками; непогані час і дальність польоту від однієї батареї.

Недоліки: немає датчиків перешкод; в комплекті лише одна батарея; є ризики з підтримкою, оскільки офіційно не постачається в Україну.

1.4.4 Xiaomi Mi Drone 4K

Дрон відомої компанії Xiaomi з корпусом середніх розмірів та вагою 1,4 кг. Велика батарея 5100 мА · год забезпечує до 27 хвилин польоту на відстані до 2 км зі швидкістю до 57 км/год. В якості монітору використовується смартфон, що кріпиться до пульта керування. На трьохосьовому підвісі з вібропоглинаючими опорами розміщується сферична камера, матриця – Sony 12,4 МП, є слот для SD-карти. Об'єktiv розкривається на 104 градусів, відео стабільне, на сучасному рівні 4K/30, є сповільнена зйомка 1080p/100 [19].

Переваги: стабільні відео у високій роздільній здатності; ширококутний об'єktiv з компенсацією дисторсії; гарна автономність і дальність польотів.

Недоліки: мало налаштувань для фотографій та відео; незручний зв'язок пульта та мобільного пристрою; погані фотографії в темряві через матрицю з шумом.

1.4.5 YUNEEC Typhoon Q500 4K

Дрон китайських авіабудівників Yuneec International з відносно великою вагою 1,7 кг, через що має невисоку швидкість – до 37 км/год при дальності польоту – 400 метрів. Велика батарея 5400 мА · год тримає дрон в повітрі до 25 хвилин. Ширококутний об'єktiv (115 градусів) виправляє дисторсію, а трьохосьовий підвіс гарантує рівні відео. Матриця 12 МП знімає 4K/30, є підтримка сповільненої зйомки

1080/120. З пульта встановлюються ключові параметри для зйомки, але матриця не підтримує ISO більше 600 – шумить. Унікальною особливістю є функція «Watch Me», при якій камера завжди буде дивитися на оператора [20].

Автоматичні режими: зліт і посадка; збереження відстані до оператора; політ за пультом.

Переваги: шикарна комплектація, повна готовність до польоту; зовнішній вигляд; стабільне відео в 4K/30, є уповільнена зйомка 1080/120.

Недоліки: немає сенсорів ближньої дії; низька швидкість та дальність польоту; матриця не призначена для нічної зйомки.

1.4.6 DJI Phantom 3 SE

Оновлений дрон від компанії DJI середнього розміру з вагою 1,2кг. Акумулятор 4480 мА · год дозволяє літати до 25 хвилин на відстані до 3,6 км зі швидкістю до 60 км/год. Сферична камера на трьохосьовому підвісі оснащена об'єктивом з кутом 94 градуса, роздільна здатність матриці 12 МП дозволяє знімати відео в 4K/30. Якість зображень забезпечується тільки освітленням, особливих режимів і спецефектів не передбачено [21].

Автоматичні режими: зліт і посадка; обліт точки; політ за пультом; політ по точкам.

Переваги: висока дальність і час польоту; зйомка відео в 4K; стабілізований по всіх осях підвіс.

Недоліки: для відкриття режиму FCC може знадобитися зміна прошивки; дешевий пластик; немає парктроників, підвищена небезпека зіткнення.

1.4.7 DJI Spark

Черговий малогабаритний дрон компанії DJI вагою 300 г. Акумулятор 1480 мА · год дозволяє літати 12-16 хвилин, реальна дальність в місті близько 30 метрів, на відкритій місцевості – до 100 метрів, швидкість – км/год. У базовій комплектації

пульту немає, управління ведеться зі смартфона по Wi-Fi. Об'єктив з кутом огляду 82 градуси не вносить спотворень, блок стабілізовано по двох осях – по горизонталі різко краще не повертати. Гарні кадри виходять тільки при яскравому світлі, результати зберігаються на SD-карту. Особливостями дрона є можливість злітати і сідати з рук без допомоги мобільного пристрою (за допомогою сонарів та камера на нижній частині корпусу). За допомогою жестів можна наближати, віддаляти та фотографувати [22].

Переваги: малі габарити; легко перевозити в штатному боксі; камера з механічною стабілізацією по двох осях; спеціальні автоматичні ефекти для відео.

Недоліки: мала дальність, час і швидкість польоту; розширення відео обмежена Full HD; немає стабілізації камери по третій осі.

1.4.8 DJI Mavic Air

Ще один дрон компанії DJI, що зайняв почасне місце в списку найкращих БПЛА 2018 року, з малою вагою 430 г. Батарея на 2375 мА · год підтримує апарат до 17 хвилин в повітрі. Стандартна швидкість дрону – 28,8 км/год, проте можна розігнатися до 68,4 км/год. Радіоканал обмежує дальність до 1,7 км, в місті – 750 м. На пульт керування кріпиться смартфон. Як і попередня модель DJI Spark, цей дрон розпізнає жести, та здатний ухилятися від статичних перешкод завдяки наявності сонарів. Стандартна камера 12 Мп забезпечена об'єктивом з кутом 85 градусів та трьохосовою стабілізацією. Доступне відео – 4K/30, для зберігання є власна пам'ять (8Гб) і SD-карта [23].

Автоматичні режими: зліт і посадка; кругові і спіральні обльоти; режим «Астероїд» – сферична панорама з ключовим об'єктом в центрі.

Переваги: легкий корпус зі складними пілонами; камера знімає відео з роздільною здатністю до 4K/30; автоматичні режими для зйомки яскравих відео.

Недоліки: дальність польоту обмежена каналом Wi-Fi; невисока якість статичних фото; помилки при склеюванні панорам.

1.4.9 DJI Mavic Pro

Остання модель компанії DJI, що увійшла до списку. Дрон вагою 734г обладнений батареєю на $\text{мА} \cdot \text{год}$, яка забезпечує високі льотні показники – до 27 хвилин польоту, максимальна швидкість – 65 км/год, підтверджена дальність – 3,5 км. Пульт керування має вбудований ЖК-екран та роз'єми для підключення смартфону. Об'єктив камери має кут огляду 78 градусів, матриця стандартна – 12 МП, блок підвішений на стабілізаторах по всіх осях. Відео записується в 4K/30 або 1280p/120 в сповільненому режимі. Фотографії виходять тільки при хорошому освітленні [24].

Автоматичні режими: зліт і посадка; спостереження за об'єктом в кадрі.

Переваги: складаний апарат займає мало місця при перевезенні; універсальне управління з пульта, смартфона або комбіноване; відео в режимі до 4K / 30 з механічною стабілізацією.

Недоліки: відсутні бічні сонари і сенсори задньої півсфери; немає ефектів для автоматичної зйомки; короткі посадочні опори вимагають рівного майданчика.

1.4.10 YUNEEC Typhoon H

Дрон від китайської компанії Yuneec International. Батареї 5400 $\text{мА} \cdot \text{год}$ вистачає на 25 хвилин польоту на відстань до 2,5 км та зі швидкістю до 70 км/год [18]. У пульт керування вбудований 7" планшет, зображення і телеметрію можна вивести на телевізор. Доступний варіант парного управління – пілот керує апаратом, оператор – об'єктивом. Об'єктив з кутом 115 градусів обертається без обмежень, стабілізований по всіх осях. Відео фіксується в роздільній здатності 4K/30, можна підібрати налаштування вручну, матриця на 12 МП забезпечує гарну якість зображень при вечірньому освітленні [25].

Переваги: незвичайний зовнішній вигляд, що змінюється в польоті; якісна зйомка відео в режимі 4K і непогані фото; стабілізована камера кругового огляду.

Недоліки: висока ціна для напівпрофесійного пристрої; для управління потрібна кваліфікація; малий об'єм батареї.

1.4.11 Оціночка характеристика БПЛА

В таблиці 1.1 наведено оціночну сітку найпопулярніших моделей дронів за версією порталу Geeksus.

Таблиця 1.1 – Оціночна сітка найпопулярніших моделей БПЛА за 2018 рік

№	Модель	Функціонал	Вартість	Камера	Управління	Дизайн	Загальна оцінка
1	YUNEEC Typhoon H	10	8	10	9	9	9,2
2	DJI Mavic Pro	8	9	8	10	8	8,6
3	DJI Mavic Air	9	8	8	9	8	8,4
4	DJI Spark	7	8	7	7	8	7,4
5	DJI Phantom 3 SE	9	9	8	8	7	8,2
6	YUNEEC Typhoon Q500 4K	8	8	8	8	9	8,2
7	Xiaomi Mi Drone 4K	8	10	7	9	8	8,4

Продовження таблиці 1.1 – Оціночна сітка найпопулярніших моделей БПЛА за 2018 рік

№	Модель	Функціонал	Вартість	Камера	Управління	Дизайн	Загальна оцінка
8	Autel Robotics X-Star Premium	8	7	8	8	8	7,8
9	Xiro XPLORE R V	7	10	7	7	8	7,8
10	Parrot Bebop Drone 2	7	9	7	8	7	7,6

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА

Структурна схема системи керування пошуково-рятувальним дроном наведена в додатку Б.

Проведений в першому розділі аналіз систем керування безпілотним літальним апаратом дозволяє сформулювати вимоги, яким повинна відповідати система автономного керування пошуково-рятувальним БПЛА, і на цій основі визначити її функції та розробити структурну схему.

Структурна схема системи керування БПЛА складається з польотного контролера, блоку управління траєкторією руху, блоку мехатроніки дрону, блоку датчиків, радіо-модему, супутниково-навігаційного блоку, блоку координат руху, блоку управління камерою, блоку управління положенням камери, самої відеокамери та її датчика положення, а також наземної станції управління.

Розглянемо детальніше роботу системи керування БПЛА на основі представленої структурної схеми.

Головним елементом системи керування є польотний контролер, функціями якого є забезпечення регулювання та стабілізації руху дрону в режимі польоту та зависання. Отримані на вхід задані параметри руху (швидкість та кути крену, тангажу, ристання) контролер порівнює з поточними, що надходять з блоку датчиків. На основі отриманих результатів він виконує розрахунки та формує сигнали керування, що передаються на блок мехатроніки дрону.

Блок датчиків містить трьохосьовий акселерометр, трьохосьовий гіроскоп та магнітометр (рисунок 2.1, А). Акселерометр призначений для вимірювання прискорення, гіроскоп – кутової швидкості, а магнітометр – магнітний компас, який дозволяє дрону синхронізувати положення дрону в просторі.

Блок мехатроніки дрону складається з чотирьох безколекторних моторів, кожен з яких з'єднаний зі спеціальним контролером швидкості (Electric Speed Controller, ESC), а ті в свою чергу з польотним контролером (рисунок 2.1, Г).

Керування дроном можна виконувати в двох режимах.

1. Автопілот. Автономне керування дроном забезпечується за допомогою наступних блоків:

- блок управління траєкторією руху – виконує аналіз поточного розташування дрону в просторі (на основі даних від блоку координації руху та супутниково-навігаційного блоку), швидкість польоту, порівнює їх з заданими, формує сигнали з необхідними параметрами руху (швидкість та кути) та передає їх на польотний контролер.

- блок координації руху – містить ряд датчиків, таких як сонари, барометр, ультразвукові далекоміри (рисунок 2.1, Б), необхідних для більш точної орієнтації дрону в просторі та для виявлення статичних перешкод.

- супутниково-навігаційний блок – складається з модуля GPS, ГЛОНАСС та 4G-модему (рисунок 2.1, В). Модулі GPS та ГЛОНАСС використовуються для визначення координат дрона, а 4G-модем застосовується для передачі даних, таких як параметри польоту та відео, через мережу Інтернет.

2. Ручне управління. Забезпечується за допомогою радіо-модему, який через антену з наземної станції управління (а саме, пульта керування) отримує сигнал з заданими параметрами руху (швидкість та кути) і транслює їх на польотний контролер (рисунок 2.2).

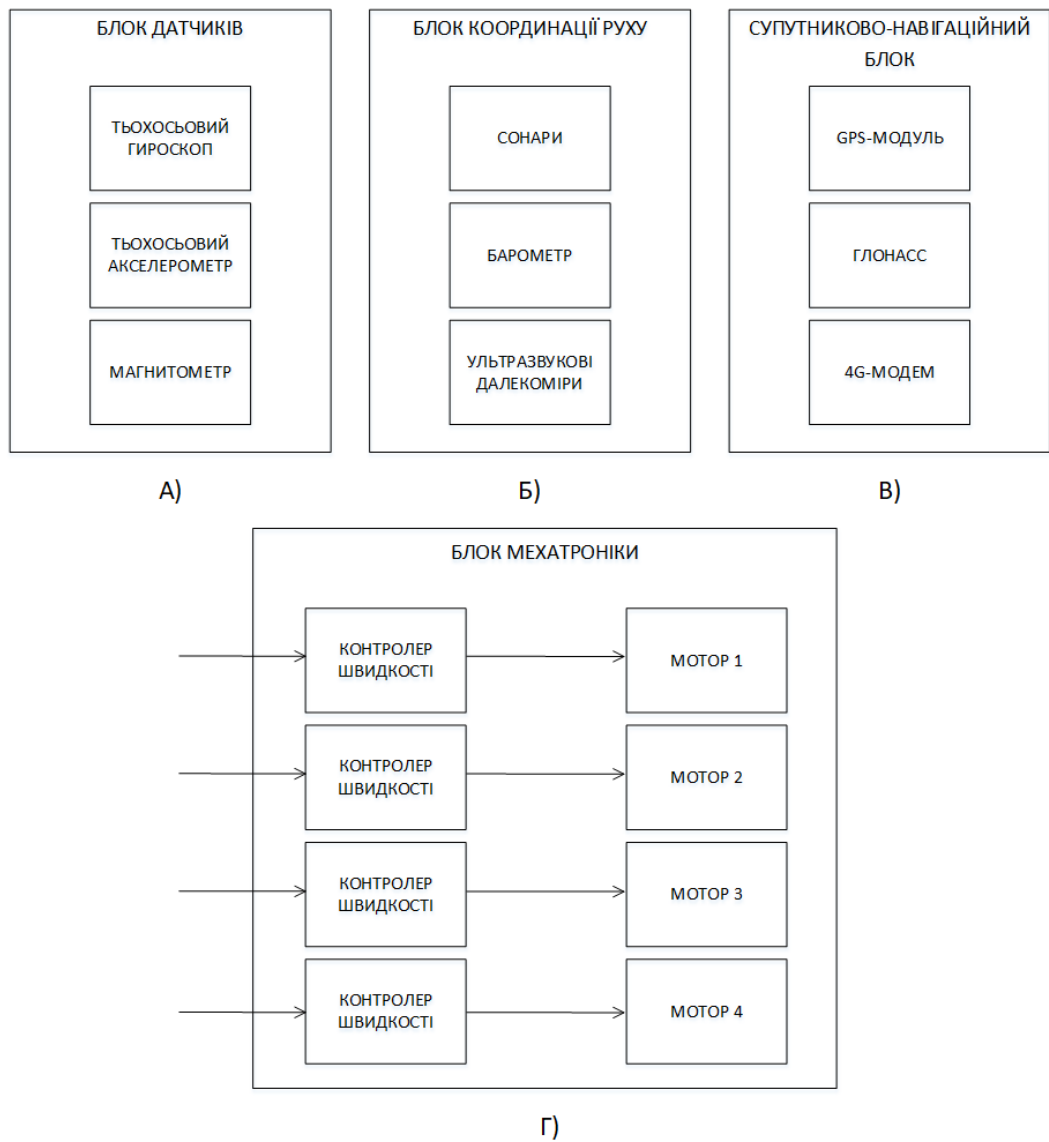


Рисунок 2.1 – Складові блоків: А) блоку датчиків; Б) блоку координації руху; В) супутниково-навігаційному блоку; Г) блоку мехатроніки

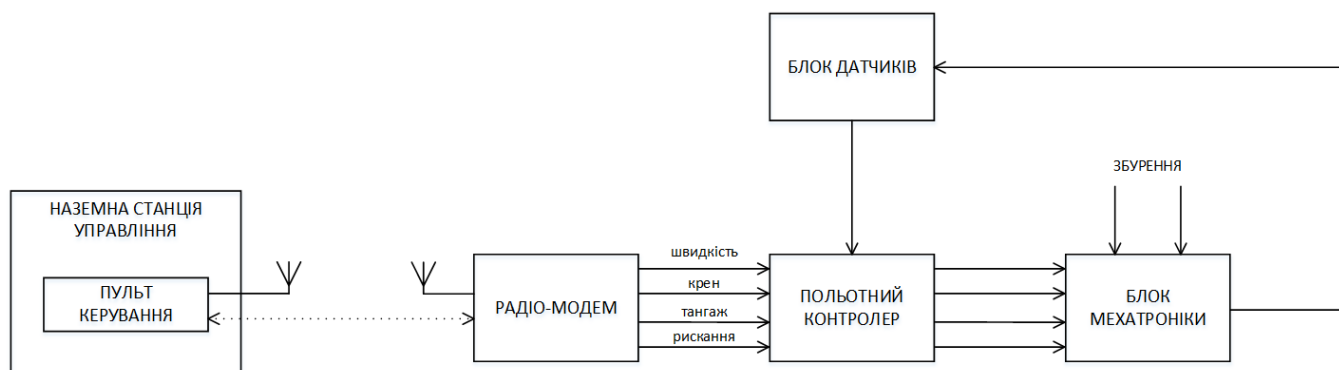


Рисунок 2.2 – Схема дистанційно-ручного керування БПЛА

Система управління камерою, що встановлена на дроні, складається з блоку управління камерою, блоку управління положенням камери та відеокамери. Блок управління камерою отримує сигнали для управління станом (ввімкнути чи вимкнути) через супутниково-навігаційний блок, за допомогою якого також виконується відео-трансляція з камери. Блок управління положенням камери, приймаючи на вході задані параметри положення камери та враховуючі поточні, отримані з датчика, формує відповідний сигнал для регулювання положення камери.

Необхідними складовими комплексу наземно станції управління є персональний комп'ютер з виходом в Інтернет або з 4G-модемом для автономного керування дроном та пульт керування (або планшет чи мобільний пристрій) – для дистанційно-ручного. За допомогою персонального комп'ютера виконується обробка відео з дрону, розпізнавання перешкод та інших об'єктів спостереження, а також корегування маршруту польоту.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА

Функціональна схема системи керування пошуково-рятувальним дроном наведена в додатку В.

Система керування пошуково-рятувальним БПЛА повинна вміти виконувати наступні функції:

- вертикальний зліт та посадку;
- вміти літати заданим маршрутом;
- виконувати стабілізацію в режимі зависання;
- повертатись на місце зльоту, виконуючи посадку в автоматичному режимі;
- автоматично редагувати польотне завдання;
- відповідати на команди зльоту/посадки через радіотелеметрію та Інтернет;
- трансляція телеметрії та відео в реальному часі через Інтернет;
- розпізнавання та ідентифікування образів.

На основі структурної схеми та визначених функцій, якими повинна володіти система керування пошуково-рятувальним БПЛА, було розроблено функціональну схему.

3.1 Польотний контролер

Ключовим елементом БПЛА є польотний контролер – це ядро дрону. В його функції входить моніторинг стану датчиків розташування та координації (гіроскоп, акселерометр, магнітометр та інші), визначення GPS-координат та на основі цих даних керувати моторами (виконувати зліт та посадку, стабілізацію, переміщення в просторі). Польотний контролер необхідно підключити до бортового комп'ютера для можливості вказати довільну точку польоту або завантаження польотного завдання, керування станом та положенням камери.

На ринку можна знайти велику кількість контролерів, що відрізняються один від одного як за функціоналом, так і за ціною. Деякі з них працюють на рідному

програмному забезпеченні (ПЗ), інші використовують open-source рішення, наприклад, такі як Ardupilot[26] та PX4[27]. Ardupilot – одне з найпопулярніших ПЗ з відкритим вихідним кодом, в ньому вже реалізовані всі необхідні функції: автоматичний зліт та посадка, завантаження польотних завдань, доступні додатки для ПК та мобільних пристроїв.

Провівши аналіз контролерів, що підтримують Ardupilot[29], було сформовано порівняльну характеристику (додаток Г). Враховуючи вагу, технічні показники та ціну, було обрано комплект – Navio 2 + Raspberry PI 3. Контролер обладнаний парою роздільних IMU датчиків MPU9250[30] (3-х осьовий гіроскоп та 3-х осьовий акселерометр) та LSM9DS1[31] (3D датчик лінійного прискорення, 3D датчик швидкості та 3D магнітний датчик), одним датчиком повітряного тиску та GNSS-модулем U-blox NEO-M8N[32], який сумісний з GPS, ГЛОНАСС і BeiDou, з роз'ємом MCX для підключення зовнішньої антени. На контролері розташований окремий процесор Cortex-M3[33] для управління ШІМ на 14 каналах і декодування вхідних SBUS і PPM сигналів від приймача. Керування процесором відбувається за допомогою драйвера в ядрі ОС Linux, що запускається на Raspberry PI 3.

3.2 Комунікація

Зв'язок з дроном буде відбуватись у двох режимах: радіотелеметрія та Інтернет.

Радіотелеметрія використовується для ручного управління дроном. Для спілкування з бортовим комп'ютером дрона використовується наземна станція управління (GCS – Ground Control Station). Обмін короткими повідомленнями відбувається по відкритому протоколу MAVLink[28] через комплект радіо-модемів: приймач FrSky D4R-II[45] – на борту дрона, передатчик – на наземній станції управління.

Для трансляції відео та телеметрії через Інтернет на дрон встановлено модуль Sky Drone Link[44] з 4G модемом та вихідним USB-портом – це система, яка передає HD-відео з камери через мережу LTE, забезпечуючи необмежений діапазон та

низькочастотну передачу відео та даних. Для кодування та трансляції відео використовується gstreamer[43].

3.3 Автоматична посадка

Для точної посадки можна використовувати стандартну камеру бортового комп'ютера, візуальні маркери і фреймворк OpenCV для їх розпізнавання [34, 35]. Але розпізнавання образів досить трудомісткий процес для Raspberry PI 3, враховуючи також, що якість розпізнавання буде залежати від матеріалу маркера та умов освітленості, тому було вирішено використовувати окремий датчик для автоматичної посадки, що здатний віддавати готові координати потрібної візуальної точки, незалежно від наявності та кута падіння світла. В списку устаткування, що підтримує Ardupilot, такий датчик присутній – IR-Lock[36]. Він зроблений на основі модуля камери з відкритим кодом Піху CMUcam5[37]. Цей модуль забезпечений камерою і процесором, і його можна «навчити» розпізнавати певні образи об'єктів, а, потім, на виході отримати готові координати цих об'єктів на зображенні.

Для нормальної роботи датчика IR-Lock необхідний далекомір, який буде вимірювати висоту над землею. Рекомендують використовувати лазерний далекомір, наприклад LightWare LW20[38] або VL53L0X[39].

Знаючи координати маркера посадки на зображенні і відстань до нього, польотний контролер обчислює на яку відстань і в яку сторону потрібно перемістити дрон.

3.4 Координація

Моніторинг координат місцезонашування дрону визначається за допомогою вбудованого в польотний контролер CNSS-модуля U-blox NEO-M8N з зовнішньою антеною, який має низьке енергоспоживання і чудово підходить для стабільних, точних та швидких польотів по карті.

Особливості NEO-M8N:

- швидкий пошук супутників (10 секунд на пошук 6 супутників);
- вбудований компас HMC5883L з частотою оновлення 160 Гц;
- підтримка GPS + ГЛОНАСС + BD.

Отримані координати від GNSS-модуля порівнюються з еталонними в бортовому комп'ютері, і відповідно до отриманої похибки виконується корегування курсу дрона.

Окрім цього необхідно забезпечити автоматичне зависання дрону на місці. Одного GNSS-модуля для цього не достатньо, через стан атмосфери координати з GPS-приймачів можуть коливатись в межах десятків метрів і для сантиметрової точності потрібно використовувати системи корегування GPS RTK[40]. Ця система використовує наземну нерухому станцію, як еталон відхилень координат, і радіозв'язок з бортом для визначення цих відхилень. Така система необхідна для зйомки фотопланів з подальшим їх склеюванням у великі карти, а для пошуково-рятувальних цілей достатньо буде обмежитись оптичними датчиками PX4Flow[41].

На відміну від IR-Lock, датчик PX4Flow не розпізнає конкретний образ і в Ardupilot вони працюють в різних польотних режимах. Зображення з камери аналізується на зміщення з частотою 400 разів в секунду, а обчислені значення зсуву можуть бути прочитані контролером по протоколу I2C. Датчик складається з процесору Cortex M4F, оптичного сенсору MT9V034 та 3-х осьового гіроскопу L3GD20. Для його нормальної роботи також рекомендується використовувати лазерний далекомір, що буде вимірювати відстань до перешкод.

Для підвищення стабілізації в режимі зависання в дрон буде вмонтовано по оптичному датчику та лазерному далекоміру на кожний борт. Це дозволить забезпечити не тільки більш точне визначення зміщення дрону відносно кожного його борту, але й зберегти стан в режимі зависання у разі відмови одного з датчиків.

3.5 Відео-трансляція

Трансляція відео з дрону забезпечується за допомогою камери GoPro Hero[46] з HD-розширенням кадрів.

Для чіткої зйомки використовується 3D Robotics Solo Gimbal[47] – 3-х осьовий підвіс зі стабілізацією. Він автоматизує широкий спектр завдань, забезпечуючи стабільне, якісне захоплення зображень, а наявність потужних комп'ютерів Solo дає безпрецедентний контроль у польоті. Завдяки 3DR Solo Gimbal є можливість передавати HD-відео відразу на пристрої iOS або Android, виконувати трансляцію через HDMI-канал, автоматично створювати знімки, а також заряджати батарею GoPro в польоті.

4 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА

У більшості випадків пошуково-рятувальні операції супроводжуються великими ризиками для здоров'я та життя команд з порятунку. До того ж, виявлення людей, що потребують допомоги, повинно відбуватися швидко та оперативно. Для вирішення цих проблем система керування пошуково-рятувальним БПЛА повинна виконувати наступні завдання:

- автоматичний вертикальний зліт та посадка;
- можливість автономного польоту заданим маршрутом;
- патрулювання важкодоступних та небезпечних місць;
- розпізнавання та ідентифікування образів;
- автоматичне редагування польотних завдань для уникнення зіткнень з перешкодами;
- сповіщення при розпізнаванні цілі.

На основі розробленої у попередньому розділі функціональної схеми та встановлених вимог до системи керування пошуково-рятувальним дроном, було розроблено 4 алгоритми:

- автоматичний зліт;
- автоматична посадка;
- автономний політ;
- патрулювання.

4.1 Алгоритм автоматичного зльоту БПЛА

Алгоритм автоматичного зльоту безпілотного літального апарату наведений у додатку Д та на рисунку 4.1.

В загальному випадку алгоритм складається з наступних кроків:

1. визначення вхідних даних: швидкість зльоту та висота;
2. розпізнавання перешкод;

3. якщо перешкода була виявлена, виконується поступове сповільнення БПЛА до тих пір, доки швидкість дрону не стане рівною нулю, або перешкода буде усунена;

4. якщо перешкода не була виявлена, виконується підйом БПЛА з відповідною швидкістю;

5. якщо бажана висота була досягнута, виконується відправлення відповідного сигналу та ініціалізується завершення процесу з переходом в режим зависання.

Початок роботи сигналізується отриманням значень швидкості зльоту та бажаної висоти. Після чого першим кроком виконується процес розпізнавання перешкод. Для виявлення перешкод на короткій відстані використовуються дані, отримані з датчиків (лазерних далекомірів та оптичних датчиків руху). У разі виявлення перешкоди виконується команда на сповільнення руху. Під час сповільнення повторно викликається процес розпізнавання перешкод. Якщо швидкість БПЛА зменшується до нуля, то відбувається завершення процесу автоматичного зльоту, який можна повторно запустити після усунення перешкоди.

Якщо ж до моменту повної зупинки БПЛА було виявлено, що шлях вільний, виконується процес підйому, що базується на даних з датчиків та супутниковій системі навігації. Після розрахунку поточної висоти БПЛА виконується її порівняння з заданою. Якщо бажана висота менша ніж поточна, відбувається перехід до кроку з виявленням перешкод. Цикл повторюється до того моменту, доки поточна висота дрону не досягне заданої.

Завершення процесу автоматичного зльоту супроводжується відправлення відповідного сигналу на наземну станцію керування та переходом до режиму зависання.

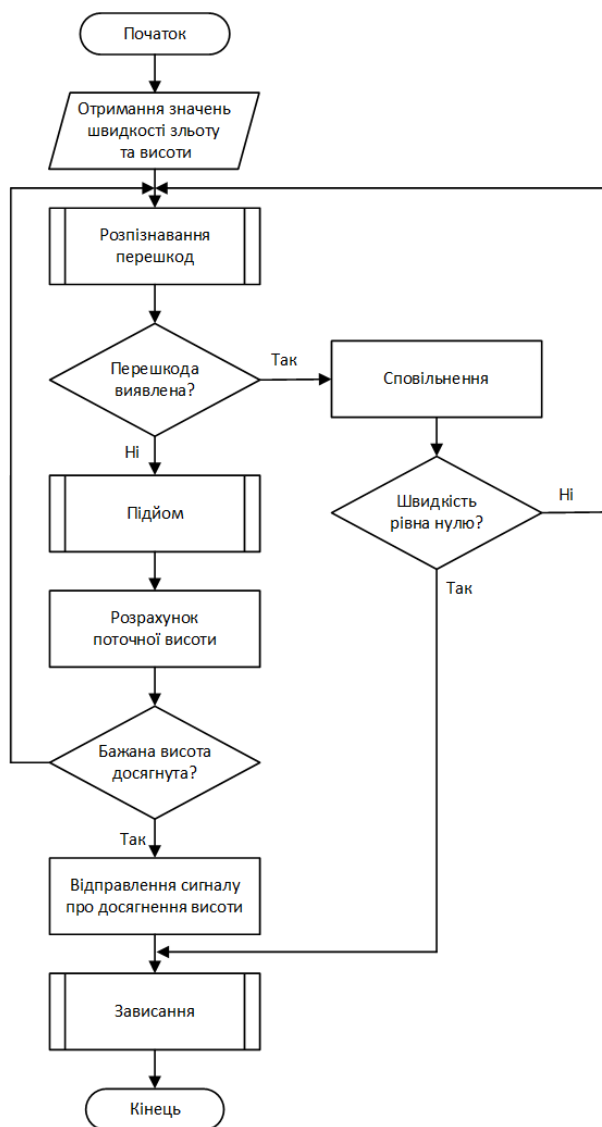


Рисунок 4.1 – Алгоритм автоматичного зльоту безпілотного літального апарату

4.2 Алгоритм автоматичної посадки БПЛА

Алгоритм автоматичної посадки безпілотного літального апарату наведений у додатку Д та на рисунку 4.2.

В загальному випадку алгоритм складається з наступних кроків:

1. визначення вхідних даних: швидкість посадки;
2. пошук та захоплення маркера посадки;
3. обчислення координат маркера посадки відносно дрону та відстані до нього;
4. вирівнювання положення дрону над маркером;
5. ітеративний спуск з верифікацією маркера посадки.

Початок роботи сигналізується отриманням значення швидкості посадки дрону. Після чого виконується процес пошуку маркера посадки, у якості якого зазвичай виступає знак у вигляді хреста. Пошук та виявлення маркера посадки відбувається за допомогою спеціального модуля-датчика, що містить камеру та процесор, який можна навчити розпізнавати образи незалежно від освітленості та матеріалу маркера.

Після того, як маркер було розпізнано та захоплено, обчислюються його координати відносно БПЛА та розраховується відстань до точки посадки. На основі отриманих значень приймається рішення про необхідність вирівнювання положення дрону відносно маркеру. Цикл повторюється доки БПЛА не досягне точки, що розташована над маркером.

Наступним етапом є поступове зменшення висоти дрону до необхідного мінімуму. На кожній ітерації спуску виконується порівняння поточної висоти дрону з пороговим значенням, і в разі невиконання умови викликається додаткова перевірка присутності маркеру посадки для уникнення аварійних ситуацій у випадках, коли попереднє розпізнавання маркеру було помилковим або він був переміщений чи взагалі прибраний. Якщо ж маркер посадки не вдалося ідентифікувати відбувається перехід на крок пошуку і далі процес повторюється. Після досягнення мінімальної висоти викликається процес посадки, що супроводжується вимкненням гвинтів та сигналізацією про завершення.

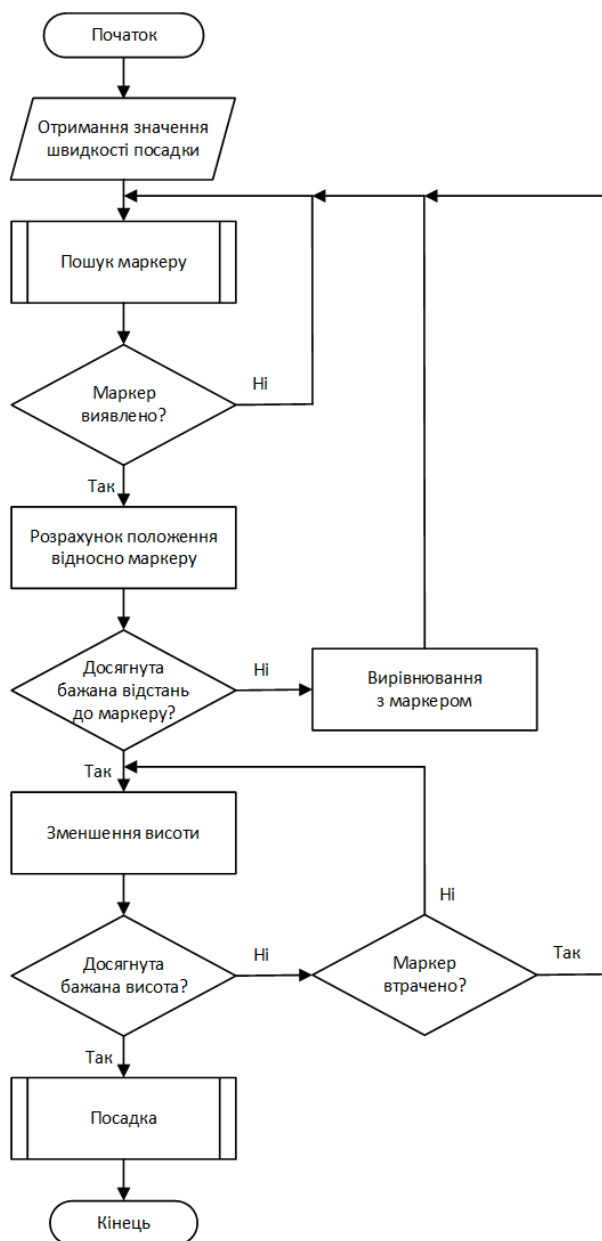


Рисунок 4.2 – Алгоритм автоматичної посадки безпілотної літальної апарату

4.3 Алгоритм автономного польоту БПЛА

Алгоритм автономного польоту безпілотної літальної апарату наведений у додатку Е та на рисунку 4.3.

В загальному випадку алгоритм складається з наступних кроків:

1. завантаження координат маршруту в систему;
2. перетворення координат маршруту до системи координат пов'язаній з БПЛА;
3. поворот БПЛА у напрямку обраних координат руху;

4. розрахунок відстані до визначеної точки;
5. розпізнавання перешкод та побудова обхідного маршруту у разі їх виявлення;
6. переміщення до визначеної точки;
7. вибір наступних координат маршруту, якщо вони присутні та повторення кроків 3-6, в іншому випадку – кінець польоту.

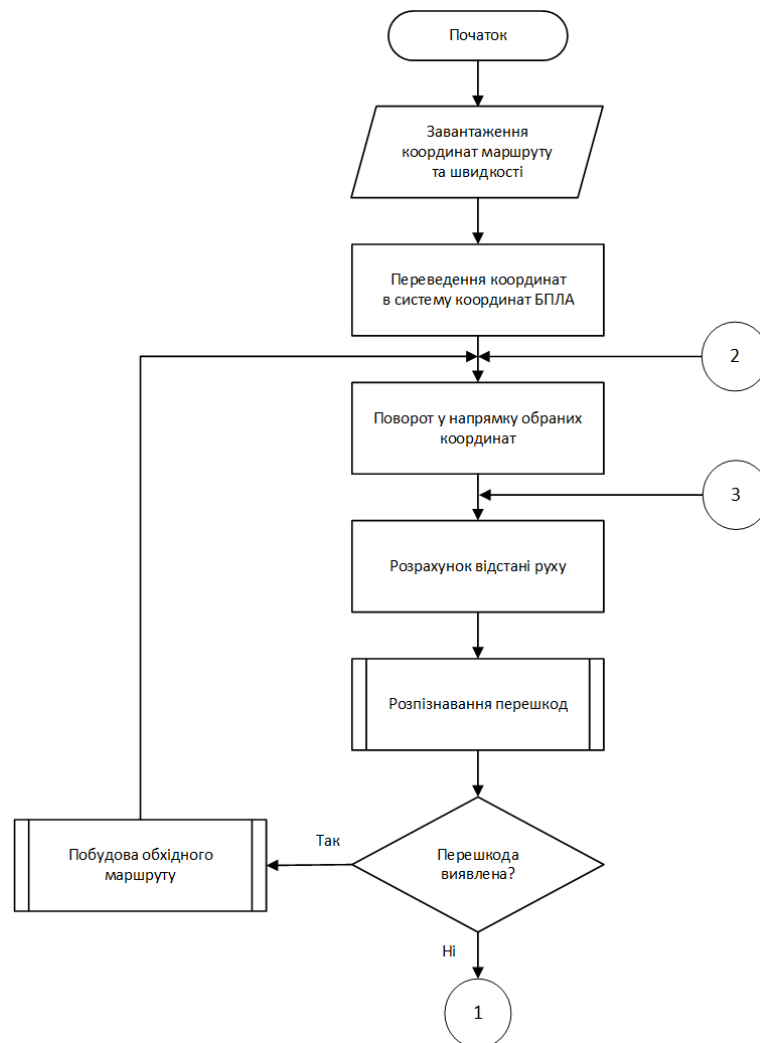


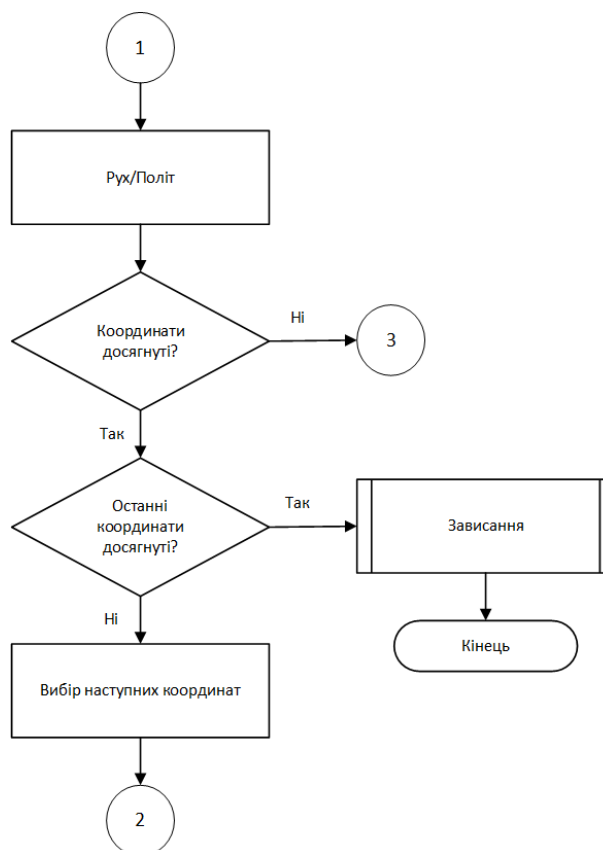
Рисунок 4.3 – Алгоритм автономного польоту безпілотної літальної апарату

Початок роботи сигналізується завантаженням маршруту польоту у вигляді масиву координат та швидкості польоту. Після чого виконується переведення координат в рухому систему координат, тобто пов'язану з БПЛА.

Далі обирається перший блок координат, вилучається з масиву, і БПЛА здійснює поворот у їх напрямку та розраховує відстань польоту. Перед тим як почати рух

запускається процес виявлення перешкод. Перешкоди на короткій відстані визначаються так само, як було описано в алгоритмі автоматичного зльоту, перешкоди на дальній відстані визначаються з урахування їх динаміки за допомогою фремів, на які розбивається відео, та алгоритму розпізнавання образів (найчастіше використовується алгоритм візуальної одометрії). У разі виявлення перешкоди виконується побудова обхідного маршруту, координати якого кладуться в початок масиву, та перехід до кроку 2 (поворот БПЛА у напрямку обраних координат).

Якщо шлях вільний, то дрон рухається у попередньо визначеному напрямку на визначену відстань. Коли обрані координати досягнуті, викликається перевірка наявності наступних координат, і, якщо вони присутні, то вони вибираються з масиву координат, після чого виконується перехід до кроку 2. Якщо масив пустий, то ініціалізується завершення польоту і дрон переходить в режим зависання.



Продовження рисунку 4.3 – Алгоритм автономного польоту безпілотною літального апарату

4.4 Алгоритм патрулювання БПЛА

Алгоритм патрулювання безпілотної літальної апарату наведений у додатку Є та на рисунку 4.4.

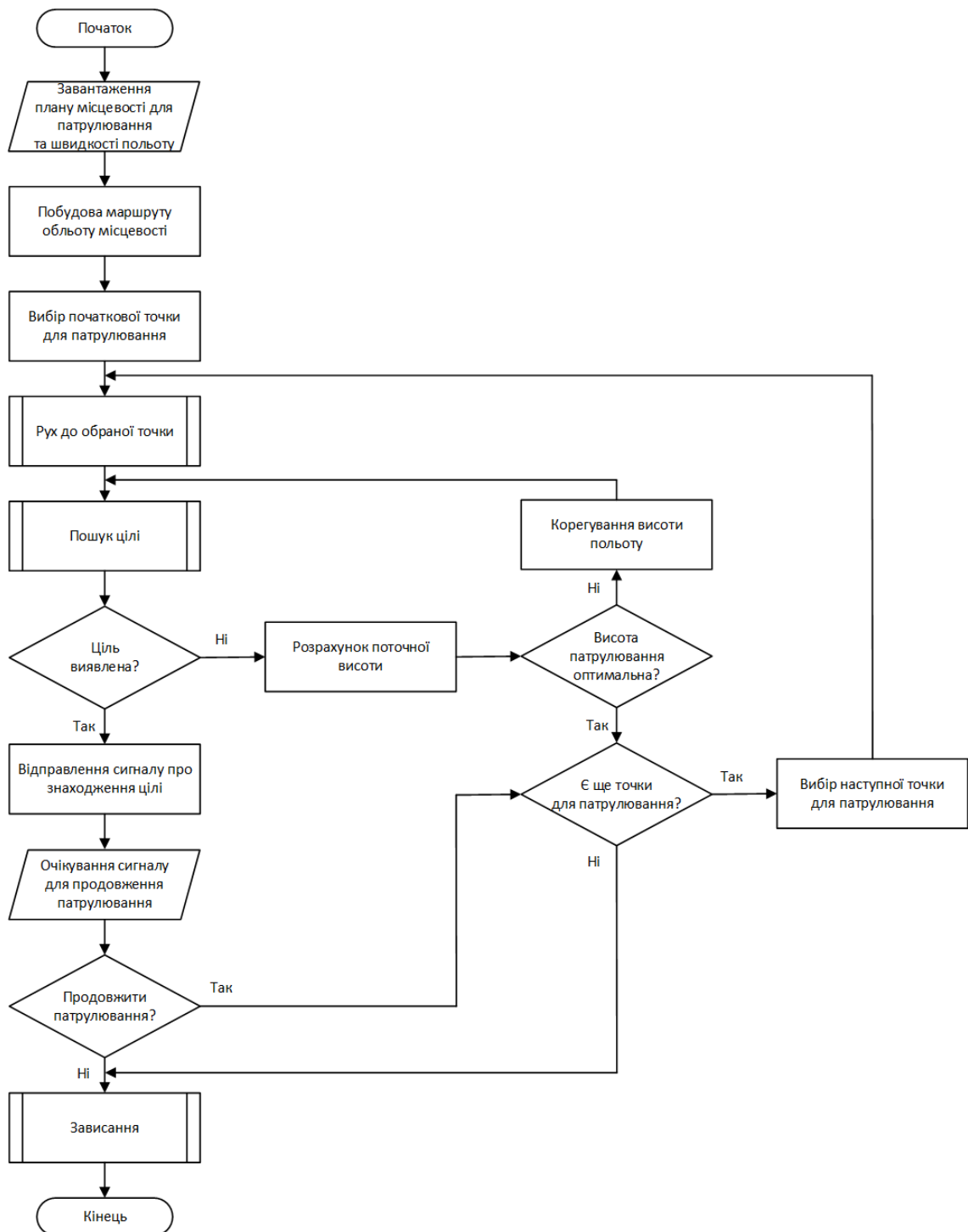


Рисунок 4.4 – Алгоритм пошуку з допомогою безпілотної літальної апарату

В загальному випадку алгоритм складається з наступних кроків:

1. завантаження плану місцевості для патрулювання та швидкості польоту;
2. побудова маршруту обльоту місцевості на її плану;
3. вибір початкової точки для патрулювання;
4. рух до обраної точки;
5. пошук цілі;
6. якщо ціль була знайдена, то відправляється відповідний сигнал з очікуванням відповіді на продовження патрулювання;
7. у разі продовження патрулювання виконується перехід до кроку 11, в іншому випадку ініціалізується завершення процесу і дрон переходить в режим зависання;
8. якщо ціль не була знайдена, то обчислюється поточна висота дрону та порівнюється з еталонною для пошуку;
9. якщо поточна висота дрону не відповідає еталонній, виконується її корегування та перехід на крок 5;
10. якщо поточна висота дрону задовільна, виконується перевірка наявності наступної точки для патрулювання;
11. якщо наступна точка для патрулювання присутня, то вона вибирається та виконується перехід до кроку 4.

Початок роботи сигналізується завантаженням плану місцевості для патрулювання та швидкості польоту. Після чого виконується побудова маршруту польоту на основі плану місцевості. Найбільш популярними методами патрулювання є «змійка» та спіраль (рисунки 4.5).



Рисунок 4.5 – Методи патрулювання місцевості «змійкою» та спіралью

Далі обирається початкова точка та виконується переміщення дрону. Рух дрону до точки патрулювання відбувається за алгоритмом польоту дрону, який наведений у розділі 4.5.

Після прибуття дрону на точку патрулювання запускається процес пошуку цілі, який аналогічний процесу пошуку перешкод на дальній відстані. У разі виявлення цілі відправляється відповідний сигнал на наземну станцію керування, після чого дрон переходить в режим очікування відповіді для продовження пошуку. Якщо продовжувати патрулювання не потрібно, ініціалізується завершення процесу і дрон переходить в режим зависання. В протилежному випадку викликається перевірка наявності наступної точки патрулювання. Якщо наступна точка присутня, вона обирається як цільова і далі повторюється цикл з кроку 4, інакше – виконується завершення процесу патрулювання, який описаний вище.

Якщо ціль взагалі не була ідентифікована на точці, в першу чергу виконується перевірка оптимальності висоти патрулювання, оскільки розпізнавання образів на різних висотах відрізняється. В разі необхідності виконується корегування висоти польоту дрону і повторюється цикл пошуку, починаючи з кроку 5. Якщо ж висота БПЛА була задовільною, то приймається рішення про відсутність цілі на поточній точці патрулювання, і виконується перехід до кроку перевірки наявності наступної точки для патрулювання.

5 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА

5.1 Постановка задачі

Побудуємо математичну модель дрону у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь, згідно [48]:

$$\ddot{X} = f(X, \dot{X}, U).$$

Вектор управління $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$ буде являти собою зусилля кожного з чотирьох моторів. Вектор X повинен відображати всі ступені свободи дрону, а саме, положення центру мас і орієнтацію тіла в просторі.

Як мету поставимо завдання синтезу системи управління, яка стабілізує положення рівноваги на бажаній висоті з бажаними кутами орієнтації дрону. При цьому стійкість повинна зберігатися при варіації параметрів моделі, які важко точно виміряти в реальних умовах.

5.2 Математична модель БПЛА

5.2.1 Система координат

У просторі дрон має шість ступенів свободи, і його рух описується відповідно шістьма диференціальними рівняннями (рівняння Ейлера). Розв'язок цих рівнянь в загальному випадку дозволив би визначати характер просторового руху дрону в будь-який момент часу і, зокрема, судити про стійкість цього руху. Однак безпосереднє вирішення цих рівнянь представляє труднощі навіть при застосуванні сучасних обчислювальних машин. Якщо ж за вихідний режим польоту прийняти прямолінійний сталий політ без ковзання і вважати відхилення параметрів руху від вихідних значень досить невеликими, то завдяки симетрії БПЛА, систему шести рівнянь руху можна розділити на дві незалежні системи рівнянь, що описують рух дрону в площині симетрії (поздовжній рух) і в двох інших площинах (бічний рух).

Для кількісного опису положення і руху дрону в просторі використовують різноманітні системи координат: інерціальні, земні та рухливі. Вибір тієї чи іншої системи координат зазвичай обумовлений задачею, що розв'язується.

Фіксована або нормальна земна система координат $O_3X_3Y_3Z_3$. Її початок O_3 лежить на поверхні землі, а осі фіксовані по відношенню до неї. Ось O_3X_3 спрямована вгору по місцевій вертикалі, тобто по прямій, що збігається з напрямком сили тяжіння. Осі O_3Y_3 і O_3Z_3 лежать в місцевій горизонтальній площині, утворюючи праву прямокутну декартову систему координат.

Пов'язана або рухома система координат $O_bX_bY_bZ_b$. Ця система координат збігається з осями тіла дрону. Її початок O_b лежить в центрі маси БПЛА, а осі $X_bY_bZ_b$ повернені на кути крену, тангажу та ролання від осей фіксованої системи координат $X_3Y_3Z_3$, як зображено на рисунку 5.1. Поздовжня вісь O_bX_b розташована в площині симетрії дрону і спрямована від хвостовій частині до носової. Нормальна вісь O_bY_b розташована в площині симетрії дрону і спрямована вгору. Поперечна вісь O_bZ_b перпендикулярна площині симетрії дрону.

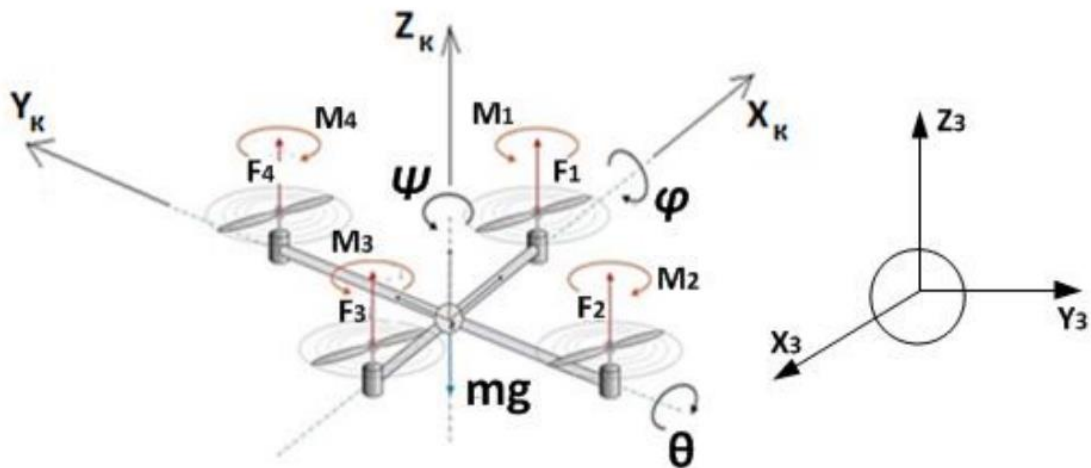


Рисунок 5.1 – Система координат і відліку положення дрону

Кути, на які дрон відхилюється відносно нерухомої системи, є кутами Ейлера та позначаються φ, θ, ψ .

Кут крену φ – це кут між поперечною віссю $O_b Z_b$ і віссю $O_3 Z_3$ нормальної системи координат, зміщеною в положення, при якому кут рискання дорівнює нулю. Кут крену позитивний, якщо зміщена вісь $O_3 Z_3$ поєднується з поперечною віссю поворотом навколо поздовжньої осі за годинниковою стрілкою, якщо дивитися в напрямку цієї осі.

Кут тангажу θ – це кут між поздовжньою віссю $O_b Y_b$ і горизонтальною площиною $O_3 X_3 Z_3$ нормальної системи координат. Його слід вважати позитивним, якщо поздовжня вісь перебуває вище горизонтальної площини $O_3 X_3 Z_3$.

Кут рискання ψ – це кут між віссю $O_3 Z_3$ нормальної системи координат і проекцією поздовжньої осі $O_b X_b$ на горизонтальну площину $O_3 X_3 Z_3$ нормальної системи координат. Кут рискання позитивний, якщо вісь $O_3 X_3$ поєднується з проекцією поздовжньої осі на горизонтальну площину поворотом навколо осі $O_3 Y_3$ за годинниковою стрілкою, якщо дивитися в напрямку цієї осі.

Поступальний рух дрону як твердого тіла в просторі є рух його центру мас відносно Землі. Просторове положення БПЛА при поступальному русі відносно Землі повністю описується трьома параметрами: широтою (Φ), довготою (L) і висотою (H).

БПЛА здійснює відносно землі, крім поступального, також обертальний рух, що представляє собою рух навколо його центру мас.

Таким чином, просторове положення дрону повністю описується шістьма параметрами: пройденою відстанню L , бічним відхиленням δ , висотою H , кутами рискання ψ , тангажу θ і крену φ .

Для переходу від однієї системи координат до іншої використовуються обертальні матриці. Процес обертання пояснюється за допомогою моделі Ньютона-Ейлера. Матриці R_X , R_Y та R_Z використовуються для визначення обертання дрону у фіксованій системі координат, що рухається в рухомій системі координат. Узагальнена матриця обертання представляється за допомогою рівняння:

$$R = R_X \cdot R_Y \cdot R_Z;$$

$$R = \begin{bmatrix} S_\theta S_\varphi S_\psi + C_\theta C_\psi & C_\varphi S_\psi & C_\theta S_\varphi S_\psi - S_\theta C_\psi \\ S_\theta S_\varphi C_\psi - C_\theta S_\psi & C_\theta C_\varphi & C_\theta S_\varphi C_\psi + S_\theta S_\psi \\ S_\theta C_\varphi & -S_\varphi & C_\theta C_\varphi \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

де R – матриця повороту навколо осі Z , $S = \sin$ – синус відповідного кута, $C = \cos$ – косинус відповідного кута.

$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\varphi & S_\varphi \\ 0 & -S_\varphi & C_\varphi \end{bmatrix}; R_Y = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & -S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S_\theta & 0 & -C_\theta \end{bmatrix}; R_Z = \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi & 0 \\ -S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Отже, за допомогою R_X , R_Y та R_Z можна визначити рухи квадрокоптера по відношенню до землі в будь-який момент часу. Це допомагає стежити за правильністю роботи вимірювальних бортових систем БПЛА.

Матрицю перетворення кутових швидкостей з абсолютної системи координат в рухому позначимо за

$$W_\eta = \begin{bmatrix} 1 & S_\varphi T_\theta & C_\varphi T_\theta \\ 0 & C_\varphi & -S_\varphi \\ 0 & \frac{S_\psi}{C_\theta} & \frac{C_\psi}{C_\theta} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

де $T_\theta = \tan(\theta)$. Матриця W_η обернена при $\theta \neq \frac{(2k-1)}{2}\varphi, k \in \mathbb{Z}$.

5.2.2 Рівняння режимів руху

БПЛА може літати тільки в чотирьох режимах: крен, тангаж, ристання і зависання. За допомогою законів аеродинаміки можна скласти узагальнені рівняння руху, які служать для опису математичної моделі польоту дрону. Аеродинамічний розрахунок заснований на двох теоріях: теорії моментів і теорії конструкції та дії гвинтів [52-54]. Теорія моментів моделює ротор як ідеальний привід, представлений як нескінченно тонкий диск, обертання якого викликає постійну швидкість уздовж осі обертання без урахування тертя [55-57]. Всі аеродинамічні сили і моменти, що діють на роторі, визначаються за допомогою теорії дії гвинтів. Наводимо аеродинамічну модель дрону з допущенням наступних факторів [58, 59]: товщина диска нескінченно мала величина; вертикальна швидкість повітря постійна навколо ротора; повітря є ідеальним нестислим газом; ротори – жорсткі, сила, паралельна валу ротора, визначається як тяга ротора T , і сила, перпендикулярна осі ротора,

визначається як сила маточини T_c . Діючі моменти на роторі є гальмівним M_T і рухомим M_{Π} моментами.

Так як розрахунок проводиться без урахування тертя, то можна припустити, що підйомна сила, що діє на гвинти, приблизно на порядок вище, ніж сили опору. На рисунку 5.2 зображені всі вище визначені аеродинамічні сили і моменти.

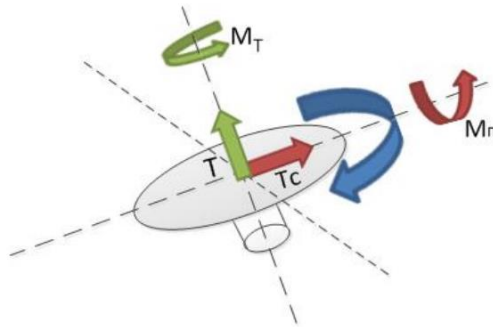


Рисунок 5.2 – Аеродинамічні сили й моменти, що діють на роторі

Дрон моделюється, як комбінація чотирьох роторів, що працюють за принципом поперечної конфігурації. Досить тонкий і легкий хрестоподібний каркас пов'язує механічні двигуни (які важче каркаса). Кожен гвинт (пропелер) пов'язаний з двигуном через редуктори. Всі осі обертання гвинтів жорстко фіксовані і паралельні. Крім того, вони мають фіксований крок обертання гвинтів, потоки повітря яких спрямовані вниз, щоб отримати направлення підйомної сили вгору. Двигуни й редуктори не є основними чинниками польоту дрону тому, що рух безпосередньо пов'язаний тільки зі швидкостями обертання гвинтів.

Для оцінки руху БПЛА, розглянемо базову модель, яка складається тільки з легкої хрестоподібної несучої конструкції з чотирма гвинтами, встановленими на її кінцях. Передній (ротор 1) і задній (ротор 3) гвинти обертаються проти годинникової стрілки, в той час як лівий (ротор 2) і правий (ротор 4) обертаються за годинниковою стрілкою (рисунок 5.3). Ця попарна конфігурація з протилежно спрямованими поворотами усуває необхідність використання хвостового гвинта, як наприклад, в випадку звичайного гелікоптера.

Кутові швидкості кожного з гвинтів позначені індексом, який відповідає порядковому номеру ротора. На доданок до змінної швидкості для кожного пропелера, стрілка вгору представляє вектор швидкості і буде завжди вказувати в такому напрямку.

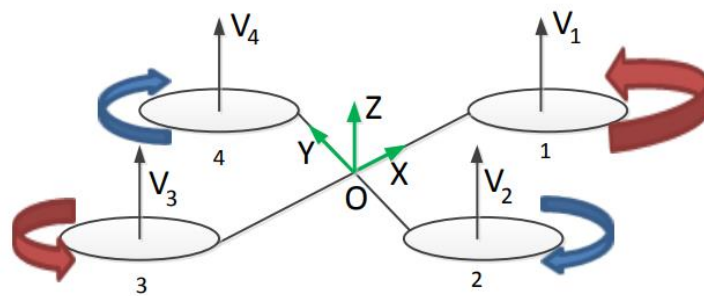


Рисунок 5.3 – Спрощена швидкісна схема квадрокоптера

Відповідно до моделі, представленої на рисунку 5.3, всі гвинти обертаються з однаковою швидкістю $\Omega_i [\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}]$, в результаті це створює протидію прискоренню вільного падіння, коли дрон знаходиться в режимі зависання. Таким чином, БПЛА знаходиться в стаціонарному режимі, так як немає сил або моментів, щоб перемістити його зі свого поточного положення.

Незважаючи на те, що дрон має шість ступенів свободи, він оснащений тільки чотирма гвинтами, отже, складно буде досягати бажаного стану для всіх ступенів свободи. Всі стани можуть бути математично розглянуті та змодельовані, проте в реальності система управління керує чотирма станами, пов'язаними з чотирма основними рухами, які дозволяють дрону досягти певної висоти та положення. Він піднімається або опускається в залежності від значення швидкості. Зобразимо математичну модель режиму зависання за допомогою формули:

$$U_1 = \sum_{i=1}^4 (\Omega_i + \delta_A) \cdot \text{sign}(\Omega_i), \quad (5.3)$$

де U_1 – позначення режиму зависання, Ω_i – швидкість обертання i -го ротору, с^{-1} ; δ_A – додатня додана величина, с^{-1} .

Режим крену забезпечується при збільшенні або зменшенні швидкості лівого або правого гвинта, що призводить до створення обертового моменту по відношенню

до осі ОХ, який дозволяє дронку обертатися. На рисунку 5.4 зображений режим крену.

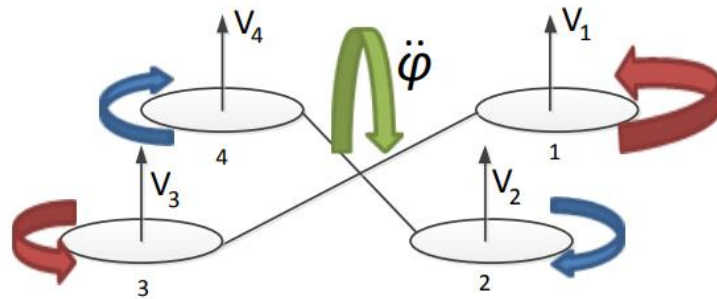


Рисунок 5.4 – Режим крену

Математична модель режиму крену представлена за допомогою виразу:

$$U_2 = \Omega_1 - (\Omega_2 + \delta_B) + \Omega_3 - (\Omega_4 + \delta_B), \quad (5.4)$$

де U_2 – позначення режиму крену; δ_B – додатня додана величина, c^{-1} .

Тангаж забезпечується при збільшенні або зменшенні швидкості заднього гвинта або при зменшенні або збільшенні кутової швидкості переднього гвинта, що призводить до створення обертового моменту по осі ОУ, який дозволяє дронку обертатися по відношенню до осі ОУ. Цей режим схожий на режим крену і призводить лише до зміни кута нахилу. На рисунку 5.5 показаний режим тангажу. Математичну модель режиму тангажу можна записати у вигляді рівняння:

$$U_3 = (\Omega_1 - \delta_B) - \Omega_2 + (\Omega_3 + \delta_A) - \Omega_4, \quad (5.5)$$

де U_3 – позначення режиму тангажу.

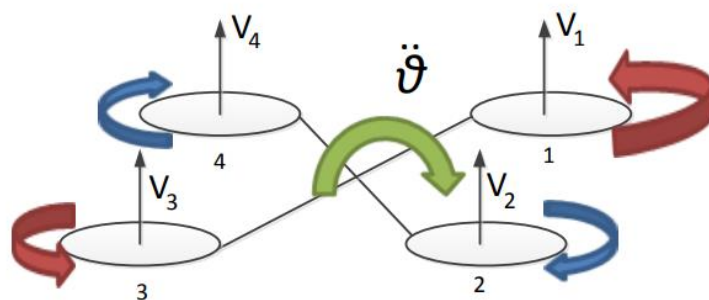


Рисунок 5.5 – Режим тангажу

Режим рискання забезпечується при збільшенні (або зменшенні) швидкостей переднього і заднього гвинтів або за рахунок зменшення або збільшення швидкостей лівого і правого гвинтів, що призводить до створення обертового моменту по відношенню до осі висоти OZ. Рух в режимі рискання створюється завдяки тому, що лівий і правий гвинти обертаються за годинниковою стрілкою, а передній і задній обертаються проти годинникової стрілки. Тому, коли загальний обертовий момент є незбалансованим, квадрокоптер повертається навколо осі OZ. На рисунку 5.6 показаний режим рискання.

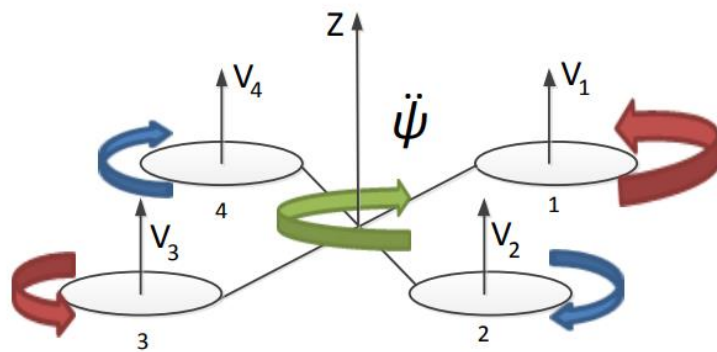


Рисунок 5.6 – Режим рискання

Математична модель режиму рискання записується у вигляді рівняння:

$$U_4 = (\Omega_1 - \delta_B) - (\Omega_2 + \delta_A) + (\Omega_3 - \delta_B) - (\Omega_4 + \delta_A), \quad (5.6)$$

де U_4 – позначення режиму рискання.

5.2.3 Кінематичні рівняння

Існують певні наближення, що використовуються при моделюванні дрону:

- тіло є абсолютно жорстким;
- осі системи тіла збігаються з основною віссю моменту інерції, тому можна сказати, що $[I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}] \approx 0$;
- 90-градусна обертова симетрія відносно осі Z, тому $I_x = I_y$;
- гіроскопічні сили ротора вважаються незначними;
- інерція двигуна мала, отже, відставання в двигунах вважається незначним.

Динамічна система представляється за допомогою 4 векторів, відношення між якими визначають закони польоту квадрокоптера. Положення дрону в просторі в залежності від фіксованої системи відліку координат представляється за допомогою векторів положення і швидкості. Цими векторами є: вектор положення дрону \bar{P} , вектор поступальної швидкості дрону \bar{V} , вектор кутової швидкості дрону \bar{W} і вектор орієнтації дрону \bar{E} .

Вектор положення дрону \bar{P} в залежності від системи координат Землі можна представити у вигляді рівняння:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

де індекси x, y, z слугують для визначення проекції вектора положення в рухомій системі координат.

Вектор поступальної швидкості дрону \bar{V} має вигляд:

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad (5.8)$$

де u, v, w – проекції поступальної швидкості в рухомій системі координат.

Вектор кутової швидкості дрону \bar{W} в залежності від фіксованої системи координат має вигляд:

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

де p, q, r є проекціями обертальної швидкості дрону в рухомій системі координат.

Вектор орієнтації дрону \bar{E} в залежності від фіксованої системи координат має вигляд:

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad (5.10)$$

де φ, θ, ψ – кути Ейлера для тангажу, крену та ристання.

Ці вектори є станами дрону в будь-якому інтервалі часу, достатньо керувати ними, щоб керувати дроном. Узагальнений вектор \bar{X} стану об'єднує всі вектори. Він описується за допомогою рівняння:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{W} \\ \bar{E} \\ \bar{P} \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

5.2.4 Динамічні рівняння

Розглядаючи дрон як тверде тіло, можемо описати його динаміку за допомогою рівнянь Ньютона-Ейлера:

$$\bar{F} = m \frac{d\bar{V}}{dt}, \quad (5.12)$$

де m – загальна маса дрону, кг; \bar{F} – вектор сумарної сили, прикладеної до дрону. Для переходу із нерухомої системи координат в рухому, перепишемо закон у вигляді:

$$\bar{F} = m \left(\frac{d_b \bar{V}}{dt} + \bar{W} + \bar{V} \right), \quad (5.13)$$

де $\frac{d_b \bar{V}}{dt}$ – лінійне прискорення дрону відносно рухомої системи координат.

Діючими силами на дрон при відсутності впливу вітру є сила тяжіння \bar{G} і сили тяги \bar{T} :

$$\bar{F} = \bar{G} + \bar{T}. \quad (5.14)$$

Обидві сили вважаються у фіксованій системі координат, отже, вираз (5.14) можна записати так:

$$\bar{F} = \bar{G}_b + \bar{T}_b; \quad (5.15)$$

$$\bar{G}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}; \quad (5.16)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$$\bar{T}_b = \sum_{i=4}^4 \tau_i = \sum_{i=4}^4 \Omega_i, \quad (5.17)$$

де τ_i – тяга i -го ротора; Ω_i – швидкість обертання i -го ротора.

Відповідно, сили \bar{G} і \bar{T} можна записати в рухомій системі координат за допомогою матриці обертання:

$$\bar{G}_b = mg \begin{bmatrix} S_\theta \\ -S_\varphi C_\theta \\ -C_\varphi C_\theta \end{bmatrix}; \quad (5.18)$$

$$\bar{T}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

З урахуванням рівнянь (5.9), (5.10), (5.18) і (5.19), рівняння (5.13) приймає наступний вигляд:

$$\bar{G}_b + \bar{T}_b = m \left(\frac{d_b \bar{V}}{dt} + \bar{W} + \bar{V} \right), \quad (5.20)$$

звідки

$$\frac{d_b \bar{V}}{dt} = \frac{1}{m} \left(mg \begin{bmatrix} S_\theta \\ -S_\varphi C_\theta \\ -C_\varphi C_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}. \quad (5.21)$$

Отже, за допомогою алгебри матриць одержимо:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} gS_\theta \\ -gS_\varphi C_\theta \\ -gC_\varphi C_\theta \end{bmatrix}. \quad (5.22)$$

Враховуючи зв'язок між лінійними швидкостями в інерціальній системі та зв'язаній задається відношенням:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R \bar{V}_b. \quad (5.23)$$

Продиференціюємо (5.23), нехтуючи \dot{R} , отримаємо:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R \bar{\dot{V}}_b. \quad (5.24)$$

Оскільки інерціальна система відліку передбачається нерухомою, то можна підставити (5.22) в (5.24), нехтуючи першим доданком в правій частині (5.22):

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi \\ S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi \\ C_\varphi C_\theta \end{bmatrix} - g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.25)$$

Доповнимо (5.25) силою аеродинамічного опору [49]

$$F_a = c_d \frac{\rho V^2}{s} S, \quad (5.26)$$

де c_d – коефіцієнт аеродинамічної сили; ρ – щільність повітря, кг/м³; V – швидкість набігаючого потоку повітря, м/с; S – площа поверхні апарату, на яку діє потік, що набігає, м².

Позначимо

$$A_x = c_d \frac{\rho \dot{x}^2}{s} S, A_y = c_d \frac{\rho \dot{y}^2}{s} S, A_z = c_d \frac{\rho \dot{z}^2}{s} S, \quad (5.27)$$

в результаті (5.25) набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi \\ S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi \\ C_\varphi C_\theta \end{bmatrix} - g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}. \quad (5.28)$$

Другий закон Ньютона для обертального руху в земній нерухомій системі має вигляд:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \bar{M}, \quad (5.29)$$

де \bar{L} – вектор кутового моменту, кг · м²/с; \bar{M} – вектор моменту обертальної сили, Н · м.

Для переходу в рухому систему координат запишемо (5.29) в наступній формі:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{d_b \bar{L}}{dt} + \bar{\omega} \times \bar{L} = \bar{M}. \quad (5.30)$$

В інерціальній системі $\bar{L} = J\bar{\omega}$, де J – тензор інерції. Будемо вважати дрон кулею з радіусом R_s , м; масою m_s , кг; на відстані l , м, від центру якого розташовані матеріальні точки з масою m_m , кг (рисунок 5.7).

Можна вважати дрон симетричним тілом, у якого головні осі інерції співпадають з осями рухомої системи координат. Тоді його тензор інерції буде мати вигляд:

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

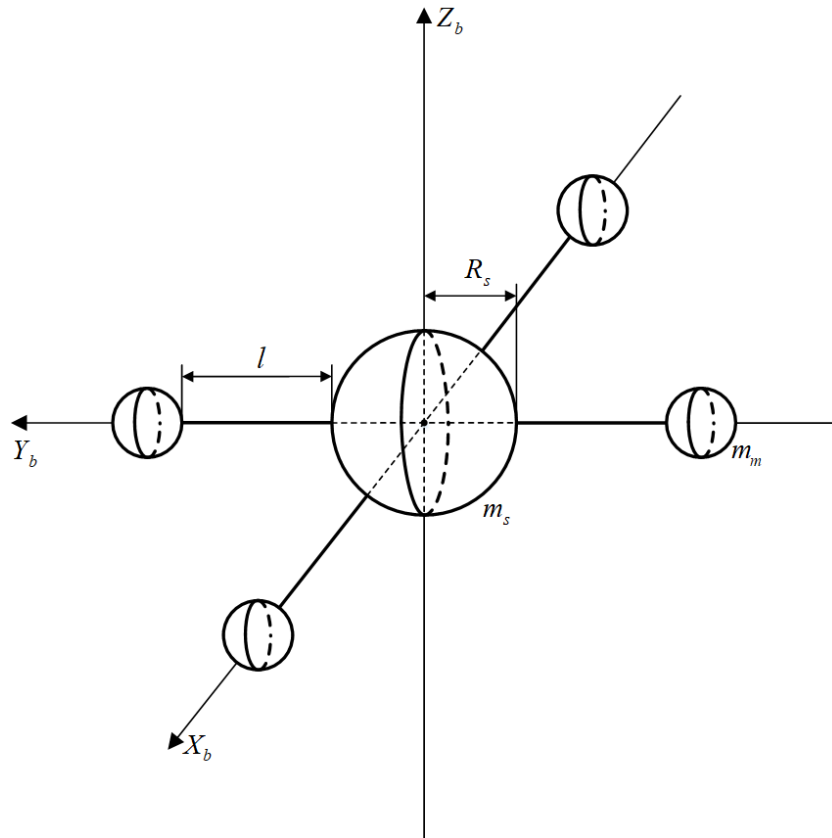


Рисунок 5.7 – Схематичне зображення дрону

Враховуючи схематичне представлення дрону (рисунок 5.7), компоненти тензора інерції обчислюються за наступними формулами:

$$J_z = \frac{2m_s R_s^2}{5} + 4l^2 m_m;$$

$$J_x = J_y = \frac{2m_s R_s^2}{5} + 2l^2 m_m.$$

Вектор моменту обертальної сили в рухомій системі координат можна записати як:

$$\bar{M}_b = \begin{bmatrix} \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix}, \quad (5.32)$$

де $\tau_\varphi, \tau_\theta, \tau_\psi$ – момент обертальної сили крену, тангажу та рискання відповідно.

Підйомна сила та обертальний момент гвинтів прямо пропорційні квадрату швидкості їх обертання [48]. Вирази для тяги і моментів мають наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lk(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ lk(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ b(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix}; \quad (5.33)$$

$$\bar{T} = (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \quad (5.34)$$

де Ω_i – швидкість обертання i -го гвинта, рад/с; k – підйомний коефіцієнт, b – коефіцієнт обертального моменту.

Підставивши (5.31-5.33) в (5.30) отримаємо:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = J^{-1} \left(\begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \right); \quad (5.35)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{J_y - J_z}{J_x} qr \\ \frac{J_z - J_x}{J_y} pr \\ \frac{J_x - J_y}{J_z} pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} \tau_\varphi \\ \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{bmatrix}. \quad (5.36)$$

Спростимо отримані рівняння. Будемо вважати, що кути φ і θ малі [50], тоді можна записати

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \frac{1}{w_\eta} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (5.37)$$

Аналогічно, рівняння (5.36) спроститься, якщо прийняти компоненти qr, pr, pq малими:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} \tau_\varphi \\ \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{bmatrix}. \quad (5.38)$$

З урахування (5.38), похідна від (5.37) буде мати вигляд:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} \tau_\varphi \\ \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

В результаті математична модель дрону набуває наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = (C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi) \frac{T}{m} - \frac{A_x}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = (S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi) \frac{T}{m} - \frac{A_y}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = C_\varphi C_\theta \frac{T}{m} - g - \frac{A_z}{m} \dot{z} \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{J_x} \tau_\varphi \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{array} \right. \quad (5.40)$$

5.3 Лінеаризація системи

З точки зору аналізу стійкості і синтезу управління нас більше цікавить лінійне наближення даної системи диференціальних рівнянь. Для того, щоб при лінеаризації управління повністю не зникло з системи, візьмемо за управління квадрат кутової швидкості гвинта – втрата знаку нас не турбує, оскільки гвинти можуть обертатися тільки в одну сторону, а їх напрямок обертання вже враховано в рівняннях.

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad u_i = \Omega_i^2.$$

За стан рівноваги візьмемо

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi_0 \end{bmatrix}, \\ u &= \begin{bmatrix} u_0 \\ u_0 \\ u_0 \\ u_0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

В результаті отримаємо наступну математичну модель:

$$\begin{cases} \ddot{x} = g\theta - \frac{A_x}{m}\dot{x} \\ \ddot{y} = -g\varphi - \frac{A_y}{m}\dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(u_1 + u_2 + u_3 + u_4) - \frac{A_z}{m}\dot{z} \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{I_x}(u_4 - u_2) \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y}(u_3 - u_1) \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z}(u_1 - u_2 + u_3 - u_4) \end{cases} \quad (5.41)$$

Отримана лінійна система (5.41) має кілька входів і кілька виходів, тому її аналіз буде досить громіздким. Цього можна уникнути, якщо спробувати розбити її на кілька систем з одним входом і одним виходом. Для цього рівняння повинні бути незалежними. Цього можна досягти, якщо допустити наступні обмеження на управління: величина u_i буде складатися з двох складових:

$$\begin{cases} u_1 = u_z + u_{\Delta\theta} \\ u_2 = u_z + u_{\Delta\varphi} \\ u_3 = u_z - u_{\Delta\theta} \\ u_4 = u_z - u_{\Delta\varphi} \end{cases} \quad (5.42)$$

Інакше кажучи, перша складова відповідає за суму всіх управлінь і буде впливати на динаміку z , тоді як друга складова впливатиме на динаміку відповідного мотору гвинта.

Тоді система (5.41) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{x} = g\theta - \frac{A_x}{m}\dot{x} \\ \ddot{y} = -g\varphi - \frac{A_y}{m}\dot{y} \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{I_x}u_{\Delta\varphi} \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y}u_{\Delta\theta} \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z}0 \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}u_z - \frac{A_z}{m}\dot{z} \end{cases} \quad (5.43)$$

Використовуючи подібне допущення ми позбавляємося можливості управляти кутом $\ddot{\psi}$, однак, це можна виправити, якщо для u_i ввести аналогічну спеціальну

заміну і синтезувати окремий регулятор. Вимагатимемо, щоб $\ddot{\theta} = \ddot{\varphi} = 0$ отже,
 $\begin{cases} u_4 - u_2 = 0 \\ u_3 - u_1 = 0 \end{cases}$. Задовольняє цим вимогам заміна:

$$\begin{cases} u_1 = u_z + u_{\Delta\psi} \\ u_2 = u_z - u_{\Delta\psi} \\ u_3 = u_z + u_{\Delta\psi} \\ u_4 = u_z - u_{\Delta\psi} \end{cases}$$

Тоді система (5.43) буде виглядати:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = \frac{1}{I_x} 0 \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} 0 \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} u_{\Delta\psi} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} u_z - \frac{A_z}{m} \dot{z} \end{cases} \quad (5.44)$$

Розглянемо систему (5.44). Очевидно, що вона складається з незалежних рівнянь.

Тоді розіб'ємо її на системи в просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = -\frac{A_z}{m} z_2 + \frac{1}{m} u_z \\ y = z_1 \end{cases} \quad (5.45)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = \frac{1}{I_y} u_{\Delta\theta} \\ y = \theta_1 \end{cases} \quad (5.46)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g\theta_1 - \frac{A_x}{m} x_1 \\ \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = \frac{1}{I_y} u_{\Delta\theta} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5.47)$$

Система для φ аналогічна системі (5.46) і відрізняється лише віссю моменту інерції, який, в силу структури дрону, однаковий. Так само, система для y аналогічна системі (5.47) і відрізняється лише тим, що замість кута θ , в ній використовується кут φ . Тому в подальшому будемо розглядати лише системи (5.46) і (5.47). Аналогічними міркуваннями з системи (5.44) отримаємо рівняння динаміки ψ :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = \psi_2 \\ \dot{\psi}_2 = \frac{1}{I_z} u_{\Delta\psi} \\ y = \psi_1 \end{cases} \quad (5.48)$$

5.4 Моделювання системи БПЛА

Для побудови передавальних функцій для систем (5.45-5.48) скористаємося простором станів.

У загальному випадку звичайних лінійних систем, описуваних системою диференціальних рівнянь в нормальній формі, розглянута система може бути визначена наступною векторно-матричною формою:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \quad (5.49)$$

де $X(t)$ – вектор стану системи, $Y(t)$ – вектор вихідних керованих величин, $U(t)$ – вектор зовнішніх впливів, $A = A_{n \times n}$, $B = B_{n \times m}$, $C = C_{r \times n}$, $D = D_{r \times m}$ – матриці системи (n – порядок системи, m – кількість входів, r – кількість виходів).

Матриця системи $A_{n \times n}$, елементи якої визначаються структурною схемою системи і значеннями її параметрів, характеризує динамічні властивості системи, її вільний рух. Матриця управління $B_{n \times m}$ визначає чутливість системи до зовнішніх впливів. Матриця спостереження $C_{r \times n}$ характеризує зв'язок вихідної величини системи з вектором стану. Матриця зв'язку $D_{r \times m}$ встановлює зв'язок вихідної величини системи із зовнішнім впливом.

Застосувавши перетворення Лапласа до (5.49) запишемо визначення передавальної функції стану дрона в загальному вигляді (враховуючи, що матриця $D = 0$):

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{CB}{sI - A} \quad (5.50)$$

де I – одинична матриця.

Розпишемо матриці A , B і C для систем (5.45-5.48) відповідно:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-A_z}{m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]; \quad (5.51)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_y} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]; \quad (5.52)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-A_x}{m} & g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{I_y} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad (5.53)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]. \quad (5.54)$$

Розв'яжемо для кожної системи (5.45-5.48) рівняння (5.50) за допомогою пакету прикладних програм MATLAB, підставивши отримані матриці (5.51 – 5.54) та взявши за номінальні значення параметрів БПЛА (таблиця 5.1). За основу взятий реальний квадрокоптер, деякі параметри якого були отримані за допомогою ідентифікації в роботі [51].

Таблиця 5.1 – Параметри математичної моделі

Параметр	Величина	Розмірність
g	9,81	м/с^2
m	1,44	кг
I_x	0,0151	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
I_y	0,0151	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
I_z	0,0253	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
A_x	0,25	кг/с
A_y	0,25	кг/с
A_z	0,25	кг/с
l	0,225	м

Виконаємо розрахунок передавальних функцій для координат та кутів дрона за допомогою пакету прикладних програм MATLAB (рисунок 5.8 та 5.9).

Отже, передавальні функції від входів $T, \tau_\varphi, \tau_\theta, \tau_\psi$ до виходів $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ мають наступний вигляд:

$$W_x(s) = W_y(s) = \frac{649.7}{s^3(s+0.1736)}; W_z(s) = \frac{0.6944}{s(s+0.1736)} \quad (5.55)$$

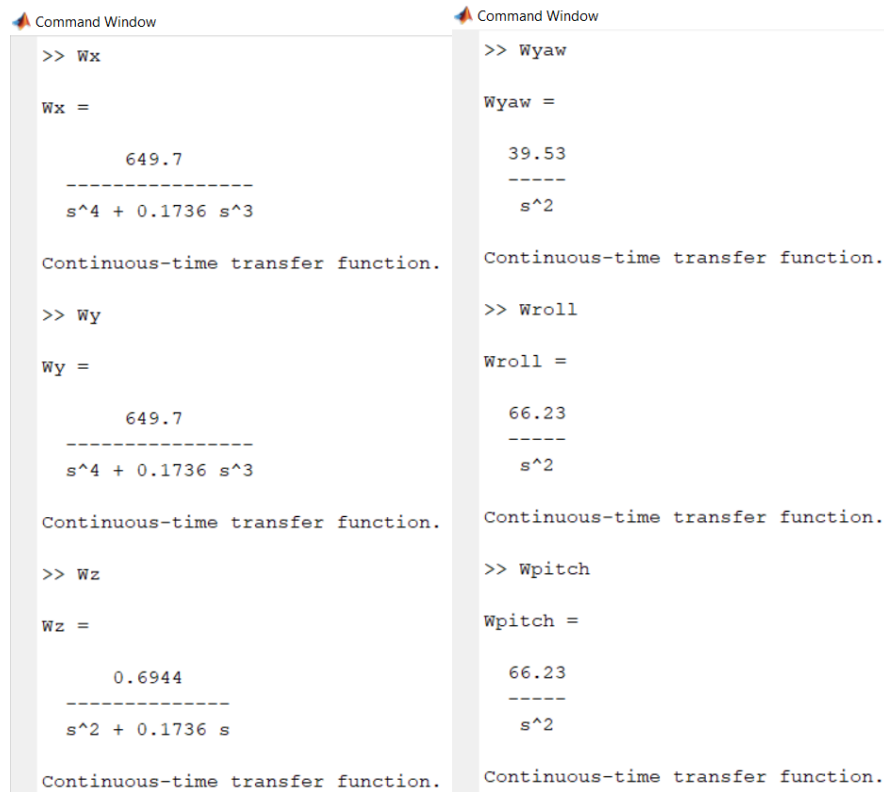
$$W_\varphi(s) = W_\theta(s) = \frac{66.23}{s^2}; W_\psi(s) = \frac{39.53}{s^2} \quad (5.56)$$

```

1 - m = 1.44;
2 - g = 9.81;
3 - l = 0.225;
4 - Ax = 0.25; Ay = Ax; Az = Ax;
5 - Ix = 0.0151; Iy = Ix; Iz = 0.0253;
6
7 - A_x = [0 1 0 0; 0 -Ax/m g 0; 0 0 0 1; 0 0 0 0];
8 - A_y = [0 1 0 0; 0 -Ay/m g 0; 0 0 0 1; 0 0 0 0];
9 - A_z = [0 1; 0 -Az/m];
10 - A_yaw = [0 1; 0 0];
11 - A_roll = [0 1; 0 0];
12 - A_pitch = [0 1; 0 0];
13
14 - B_x = [0; 0; 0; 1/Iy];
15 - B_y = [0; 0; 0; 1/Ix];
16 - B_z = [0; 1/m];
17 - B_yaw = [0; 1/Iz];
18 - B_roll = [0; 1/Ix];
19 - B_pitch = [0; 1/Iy];
20
21 - C_x = [1 0 0 0];
22 - C_y = [1 0 0 0];
23 - C_z = [1 0];
24 - C_yaw = [1 0];
25 - C_roll = [1 0];
26 - C_pitch = [1 0];
27
28 - S_x = ss(A_x, B_x, C_x, 0);
29 - S_y = ss(A_y, B_y, C_y, 0);
30 - S_z = ss(A_z, B_z, C_z, 0);
31 - S_yaw = ss(A_yaw, B_yaw, C_yaw, 0);
32 - S_roll = ss(A_roll, B_roll, C_roll, 0);
33 - S_pitch = ss(A_pitch, B_pitch, C_pitch, 0);
34
35 - Wx = tf(S_x);
36 - Wy = tf(S_y);
37 - Wz = tf(S_z);
38 - Wyaw = tf(S_yaw);
39 - Wroll = tf(S_roll);
40 - Wpitch = tf(S_pitch);

```

Рисунок 5.8 – Розрахунок передавальних функцій системи керування БПЛА за допомогою пакету прикладних програм MATLAB



```
>> Wx

Wx =

      649.7
-----
s^4 + 0.1736 s^3

Continuous-time transfer function.

>> Wy

Wy =

      649.7
-----
s^4 + 0.1736 s^3

Continuous-time transfer function.

>> Wz

Wz =

      0.6944
-----
s^2 + 0.1736 s

Continuous-time transfer function.

>> Wyaw

Wyaw =

      39.53
-----
s^2

Continuous-time transfer function.

>> Wroll

Wroll =

      66.23
-----
s^2

Continuous-time transfer function.

>> Wpitch

Wpitch =

      66.23
-----
s^2

Continuous-time transfer function.
```

Рисунок 5.9 – Значення передавальних функцій системи керування БПЛА, знайдені за допомогою пакету прикладних програм MATLAB

6 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

6.1 Передавальна функція системи керування БПЛА в цифровому вигляді

Система управління пошуково-рятувальним БПЛА розроблена на основі мікроконтролера, тому така система належить до цифрових систем автоматичного управління. Найбільш придатними методами для дослідження цифрових систем є методи розрахунку засновані на розгляді лінеаризованих імпульсних систем з урахуванням квантування за рівнем [60]. Така система містить імпульсну ланку чи ланки, що перетворюють вхідний вплив у послідовність імпульсів. З метою спрощення дослідження імпульсних систем, присутні в них реальні імпульсні елементи замінюють послідовним з'єднанням ідеального імпульсного елемента (ІЕ) і формуючого елемента (ФЕ) (рисунок 6.1). Послідовне з'єднання формуючого елемента та безперервної частини системи називається приведеною безперервною частиною системи.

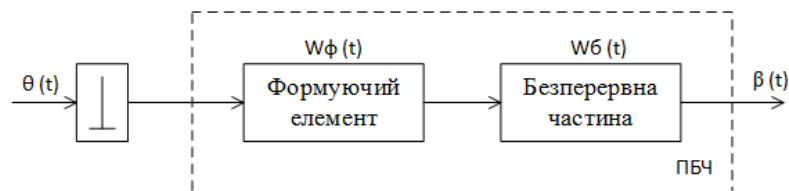


Рисунок 6.1 – Структурна схема імпульсної системи

6.1.1 Аналітичний розрахунок цифрової передавальної функції

В якості формуючого елемента, як правило, використовують фіксатор нульового порядку, передавальна функція якого має вигляд:

$$W_{\Phi e}(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} \quad (6.1)$$

Тоді передавальну функцію приведеної безперервної частини системи можна записати, як

$$W_{\text{пбч}}(s) = W_{\Phi e}(s) \cdot W_{\beta\text{ч}}(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} \cdot W_{\beta\text{ч}}(s) \quad (6.2)$$

Для подальшої роботи з математичною моделлю необхідно виконати перетворення приведеної безперервної частини до цифрового вигляду. Для чого застосовують Z-перетворення, в основі яких лежить дискретне перетворення Лапласа.

Використовуючи формулою звичайного Z-перетворення (6.3) та теорему про заміщення аргументу в оригіналі (6.4), отримаємо формулу приведеної безперервної частини цифрової системи (6.5).

$$W_{\text{пбч}}(z) = \mathbb{Z}\{W_{\text{пбч}}(s)\} \quad (6.3)$$

$$\mathbb{Z}\{f(t \pm vt)\} = \mathbb{Z}\{e^{\pm vT_0s} F(s)\} = z^{\pm v} \mathbb{Z}\{F(s)\} \quad (6.4)$$

Підставимо (6.2) в (6.3) та застосуємо (6.4) отримаємо:

$$\begin{aligned} W_{\text{пбч}}(z) &= \mathbb{Z}\left\{\frac{1-e^{-T_0s}}{s} \cdot W_{\text{бч}}(s)\right\} = \\ &= \mathbb{Z}\left\{\frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} - \frac{e^{-T_0s}W_{\text{бч}}(s)}{s}\right\} = \mathbb{Z}\left\{\frac{W_{\text{бч}}(s)}{s}\right\} - z^{-1}\mathbb{Z}\left\{\frac{W_{\text{бч}}(s)}{s}\right\} = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z}\left\{\frac{W_{\text{бч}}(s)}{s}\right\} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Далі, використовуючи (6.5) та таблицю перетворень [60], виконаємо перехід до цифрової моделі системи управління пошуково-рятувальним БПЛА, безперервна частина якої описується передавальними функціями (5.55, 5.56). Детальні розрахунки наведені у додатку Ж до магістерської дисертації.

$$W_z(z) = \frac{0.003452z+0.003432}{z^2-1.9828z+0.9828} \quad (6.6)$$

$$W_x(z) = W_y(z) = \frac{0.002698z^3+0.02957z^2+0.02947z+0.00267}{z^4-3.9828z^3+5.948z^2-3.948z+0.9828} \quad (6.7)$$

$$W_\varphi(z) = W_\theta(z) = \frac{0.33115z+0.33115}{z^2-2z+1} \quad (6.8)$$

$$W_\psi(z) = \frac{0.19765z+0.19765}{z^2-2z+1} \quad (6.9)$$

6.1.2 Розрахунок цифрової передавальної функції засобами середовища MATLAB

Функцію приведеної безперервної частини цифрової системи можна отримати за допомогою пакету прикладних програм MATLAB. Для цього необхідно визначити саму передавальну функцію безперервної частини системи, виконавши команду $tf([a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n], [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m])$, вказавши коефіцієнти чисельника та знаменника.

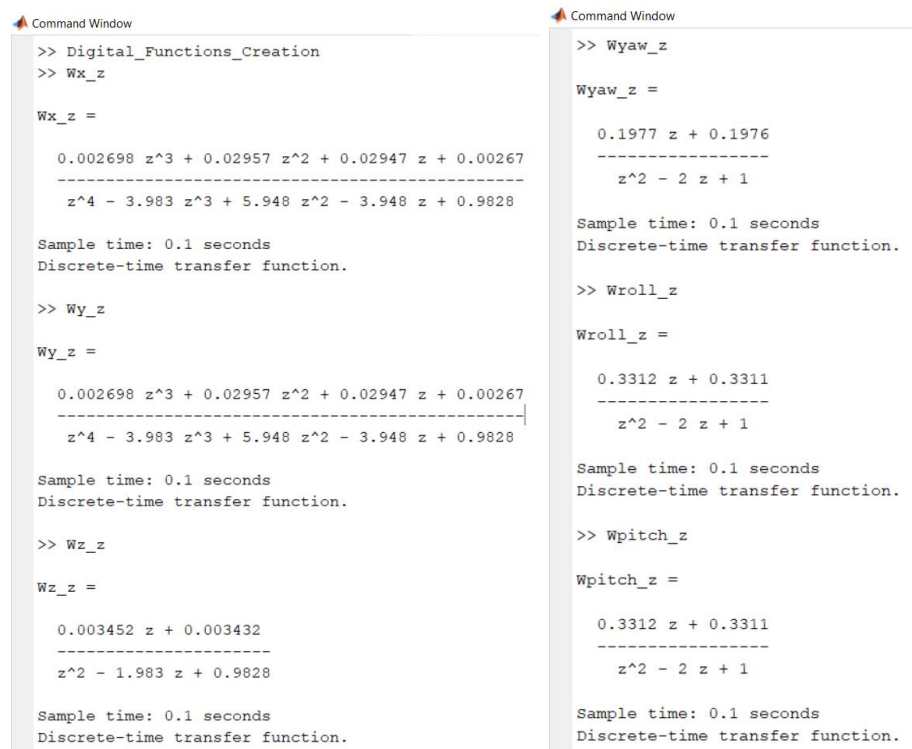
Після чого, за допомогою команди $c2d(w, T)$, вказавши першим аргументом змінну створеної попередньо передавальної функції, другим – період квантування, перейти до дискретного вигляду приведеної безперервної частини системи. На рисунку 6.2 зображено розрахунок передавальних функцій цифрової системи керування пошуково-рятувальним БПЛА, а на рисунку 6.3 - результат виконання цих команд для системи описаної передавальними функція (6.6-6.9).

```

1 - T = 0.1;
2
3 - Wx = tf(649.7, [1 0.1736 0 0 0]);
4 - Wy = tf(649.7, [1 0.1736 0 0 0]);
5 - Wz = tf(0.6944, [1 0.1736 0]);
6 - Wyaw = tf(39.53, [1 0 0]);
7 - Wroll = tf(66.23, [1 0 0]);
8 - Wpitch = tf(66.23, [1 0 0]);
9
10 - Wx_z = c2d(Wx, T);
11 - Wy_z = c2d(Wy, T);
12 - Wz_z = c2d(Wz, T);
13 - Wyaw_z = c2d(Wyaw, T);
14 - Wroll_z = c2d(Wroll, T);
15 - Wpitch_z = c2d(Wpitch, T);

```

Рисунок 6.2 – Розрахунок функцій приведеної безперервної частини цифрової системи за допомогою пакету прикладних програм MATLAB



The figure consists of two side-by-side screenshots of the MATLAB Command Window. The left window shows the conversion of three continuous-time transfer functions (Wx, Wy, Wz) to discrete-time transfer functions (Wx_z, Wy_z, Wz_z) using the `c2d` function with a sample time of 0.1 seconds. The right window shows the conversion of three more continuous-time transfer functions (Wyaw, Wroll, Wpitch) to discrete-time transfer functions (Wyaw_z, Wroll_z, Wpitch_z) using the same `c2d` function and sample time. Each conversion displays the resulting discrete-time transfer function in a standard rational form.

```

>> Digital_Functions_Creation
>> Wx_z

Wx_z =

    0.002698 z^3 + 0.02957 z^2 + 0.02947 z + 0.00267
    -----
    z^4 - 3.983 z^3 + 5.948 z^2 - 3.948 z + 0.9828

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> Wy_z

Wy_z =

    0.002698 z^3 + 0.02957 z^2 + 0.02947 z + 0.00267
    -----
    z^4 - 3.983 z^3 + 5.948 z^2 - 3.948 z + 0.9828

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> Wz_z

Wz_z =

    0.003452 z + 0.003432
    -----
    z^2 - 1.983 z + 0.9828

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

```

>> Wyaw_z

Wyaw_z =

    0.1977 z + 0.1976
    -----
    z^2 - 2 z + 1

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> Wroll_z

Wroll_z =

    0.3312 z + 0.3311
    -----
    z^2 - 2 z + 1

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> Wpitch_z

Wpitch_z =

    0.3312 z + 0.3311
    -----
    z^2 - 2 z + 1

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Рисунок 6.3 – Передавальні функції цифрової системи керування пошуково-рятувального БПЛА, обчислені за допомогою пакету прикладних програм MATLAB

Порівнявши передавальні функції приведеної безперервної частини цифрової системи знайдену аналітично та за допомогою пакету прикладних програм MATLAB, можна зробити висновок, що вони збіглися. Отже, передавальні функції цифрової САУ пошуково-рятувальним БПЛА (6.6-6.9) знайдені вірно.

6.2 Аналіз стійкості цифрової САУ

Одним з перших питань, що виникають при дослідженні і проектуванні лінійних систем управління, є питання їх стійкості. Система називається стійкою, якщо при виведенні її зовнішніми впливами зі стану рівноваги (спокою) вона повертається в нього після припинення зовнішніх впливів. Якщо після припинення зовнішнього впливу система не повертається до стану рівноваги, то вона є нестійкою. Для нормального функціонування системи управління необхідно, щоб вона була стійкою, тому що в іншому випадку в ній виникають великі помилки [61].

6.2.1 Перевірка системи на стійкість за загальним алгоритмом

Загальний алгоритм дослідження стійкості полягає в безпосередньому обчисленні характеристичного рівняння. Необхідною і достатньою умовою стійкості системи є розташування коренів характеристичного рівняння у межах кола одиничного радіусу на площині Z .

Якщо характеристичне рівняння цифрової системи

$$a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (6.10)$$

то для стійкості системи необхідно, щоб виконувалася умова

$$|z_k| < 1, k = \overline{1, n} \quad (6.11)$$

Для комплексних коренів умова (6.11) може бути записано у вигляді

$$\sqrt{U_{zk}^2 + V_{zk}^2} < 1 \quad (6.12)$$

де U_{zk} — дійсна частина кореня; V_{zk} — уявна частина кореня.

Алгоритм розв'язання задачі дослідження стійкості шляхом безпосереднього обчислення характеристичного рівняння.

1. Визначення передавальної функції приведеної безперервної частини $W_{\text{пбч}}(z)$.

$$W_z(z) = \frac{0.003452z+0.003432}{z^2-1.9828z+0.9828}; W_x(z) = W_y(z) = \frac{0.002698z^3+0.02957z^2+0.02947z+0.00267}{z^4-3.9828z^3+5.948z^2-3.948z+0.9828}$$

$$W_\varphi(z) = W_\theta(z) = \frac{0.3312z+0.3311}{z^2-2z+1}; W_\psi(z) = \frac{0.1977z+0.1976}{z^2-2z+1}$$

2. Визначення передавальної функції замкнутої системи $W_3(z)$. Перехід до замкненої системи здійснюється за формулою:

$$W_3(z) = \frac{W_{\text{пбч}}(z)}{1+W_{\text{пбч}}(z)} \quad (6.13)$$

Згідно (6.13) знайдемо передавальні функції замкнених цифрових систем:

$$W_z(z) = \frac{0.003686z+0.003192}{z^2-1.97911z+0.985992} \quad (6.14)$$

$$W_x(z) = W_y(z) = \frac{0.002698z^3+0.02957z^2+0.02947z+0.00267}{z^4-3.9801z^3+5.94887z^2-3.91853z+0.98547} \quad (6.15)$$

$$W_\varphi(z) = W_\theta(z) = \frac{0.3311z+0.3311}{z^2-1.6689z+1.3311} \quad (6.16)$$

$$W_\psi(z) = \frac{0.1976z+0.1976}{z^2-1.8024z+1.1976} \quad (6.17)$$

3. Запис характеристичного рівняння та знаходження його коренів $z_k, k = \overline{1, n}$.

З (6.14-6.17) характеристичні замкнених цифрових систем поліноми мають вигляд:

$$D_z(z) = z^2 - 1.97911z + 0.985992 \quad (6.18)$$

$$D_x(z) = D_y(z) = z^4 - 3.9801z^3 + 5.94887z^2 - 3.91853z + 0.98547 \quad (6.19)$$

$$D_\varphi(z) = D_\theta(z) = z^2 - 1.6689z + 1.3311 \quad (6.20)$$

$$D_\psi(z) = z^2 - 1.8024z + 1.1976 \quad (6.21)$$

Знайдемо корені рівняння $D(z) = 0$.

$$D_z(z) = z^2 - 1.97911z + 0.985992 = 0$$

$$\Rightarrow z_{1,2} = 0.989555 \pm 0.0822855j \quad (6.22)$$

$$D_x(z) = D_y(z) = z^4 - 3.9801z^3 + 5.94887z^2 - 3.91853z + 0.98547$$

$$\Rightarrow z_{1,2} = 0.689326 \pm 0.256732j; z_{3,4} = 1.30072 \pm 0.359742j \quad (6.23)$$

$$D_{\varphi}(z) = D_{\theta}(z) = z^2 - 1.6689z + 1.3311 = 0$$

$$\Rightarrow z_{1,2} = 0.83445 \pm 0.796739j \quad (6.24)$$

$$D_{\psi}(z) = z^2 - 1.8024z + 1.1976 = 0$$

$$\Rightarrow z_{1,2} = 0.9012 \pm 0.620837j \quad (6.25)$$

4. За допомогою умов (6.12) і (6.13) перевірити, чи належать корені характеристичного рівняння колу одиничного радіуса.

Корені характеристичних рівнянь мають комплексний вигляд (6.22-6.25), тому скористаємося умовою (6.12):

$$(z) \quad z_{1,2} = \sqrt{0.989555^2 + 0.0822855^2} = \sqrt{0.98599} = 0.99297 \quad (6.26)$$

$$(x, y) \quad z_{1,2} = \sqrt{0.689326^2 + 0.256732^2} = \sqrt{0.541082} = 0.735583 \quad (6.27)$$

$$(x, y) \quad z_{3,4} = \sqrt{1.30072^2 + 0.359742^2} = \sqrt{1.821287} = 1.34955 \quad (6.28)$$

$$(\varphi, \theta) \quad z_{1,2} = \sqrt{0.83445^2 + 0.796739^2} = \sqrt{1.331099} = 1.15373 \quad (6.29)$$

$$(\psi) \quad z_{1,2} = \sqrt{0.9012^2 + 0.620837^2} = \sqrt{1.1976} = 1.09435 \quad (6.30)$$

Оскільки вирази (6.28-6.20) мають значення більше одиниці, то корені їхніх характеристичних рівнянь лежать за межами кола одиничного радіуса, що свідчить про нестійкість систем $W_x(z), W_y(z), W_{\varphi}(z), W_{\theta}(z), W_{\psi}(z)$. Проте значення (6.26) менше одиниці, через що можна зробити висновок, що система $W_z(z)$ є стійкою.

6.2.2 Перевірка системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца

Виконаємо дослідження цифрової САУ на стійкість за допомогою критерію Гурвіца. Для його застосування попередньо необхідно виконати білінійне перетворення [60].

Алгоритм розв'язання задачі дослідження стійкості за допомогою білінійної перетворення.

1. Визначається передавальної функції приведеної безперервної частини $W_{пбч}(z)$.

$$W_z(z) = \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.9828z + 0.9828}; W_x(z), W_y(z) = \frac{0.002698z^3 + 0.02957z^2 + 0.02947z + 0.00267}{z^4 - 3.9828z^3 + 5.948z^2 - 3.948z + 0.9828};$$

$$W_{\varphi}(z) = W_{\theta}(z) = \frac{0.3311z+0.3311}{z^2-2z+1}; W_{\psi}(z) = \frac{0.1976z+0.1976}{z^2-2z+1}.$$

2. Визначається передатна функція замкнутої системи $W_3(z)$. Записується характеристичне рівняння $D(z)$.

Характеристичні рівняння замкнених систем були знайдені в пункті 6.2.1 (6.18-6.21) і дорівнюють:

$$D_z(z) = z^2 - 1.97911z + 0.985992$$

$$D_x(z) = D_y(z) = z^4 - 3.9801z^3 + 5.94887z^2 - 3.91853z + 0.98547$$

$$D_{\varphi}(z) = D_{\theta}(z) = z^2 - 1.6689z + 1.3311$$

$$D_{\psi}(z) = z^2 - 1.8024z + 1.1976$$

3. Для характеристичного рівняння виконується білінійне перетворення, вводячи заміну $z = \frac{1+w}{1-w}$.

Виконаємо підстановку $z = \frac{1+w}{1-w}$ та знайдемо характеристичні рівняння $D(w)$. Детальні розрахунки наведено у додатку 3 до магістерської дисертації.

$$D_z(w) = \frac{3.965102w^2+0.028016w+0.006882}{(1-w)^2} \quad (6.31)$$

$$D_x(w) = D_y(z) = \frac{15.833w^4+0.18126w^3+0.01508w^2-0.06502w+0.03571}{(1-w)^2} \quad (6.32)$$

$$D_{\varphi}(w) = D_{\theta}(z) = \frac{4w^2-0.6622w+0.6622}{(1-w)^2} \quad (6.33)$$

$$D_{\psi}w = \frac{4w^2-0.3952w+0.3952}{(1-w)^2} \quad (6.34)$$

4. До характеристичного рівняння $D(w)$ застосовується критерій Гурвіца.

За критерієм Гурвіца необхідною і достатньою умовою стійкості системи є додатній знак всіх n визначників Гурвіца при $a_0 > 0$. Перевіримо виконання умови стійкості для (6.31-6.34).

Застосуємо окремий випадок критерію Гурвіца для поліному другого ступеня, що описується системою

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_1 > 0 \\ \Delta_2 = a_1 \cdot a_2 > 0 \end{cases}$$

тоді, для (6.31, 6.33 і 6.34) матимемо

$$\Delta_{z1} = a_1 = 3.965102 > 0, \Delta_{z2} = a_1 \cdot a_2 = 0.111086 > 0$$

$$\Delta_{\varphi 1} = \Delta_{\theta 1} = a_1 = 4 > 0, \Delta_{\varphi 2} = \Delta_{\theta 1} = a_1 \cdot a_2 = -2.6488 < 0$$

$$\Delta_{\psi 1} = a_1 = 4 > 0, \Delta_{\psi 2} = a_1 \cdot a_2 = -1.5808 < 0$$

Для поліному 4-го ступеня, критерій Гурвіца буде мати вигляд:

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_1 > 0 \\ \Delta_2 = a_1 \cdot a_2 > 0 \\ \Delta_3 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 > 0 \\ \Delta_4 = a_3 \cdot (a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) - a_4 a_1^2 > 0 \end{cases}$$

тоді, для (6.32) отримаємо:

$$\Delta_1 = a_1 = 0.18126 > 0$$

$$\Delta_2 = a_1 \cdot a_2 = 0.002733 > 0$$

$$\Delta_3 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 = 1.032195 > 0$$

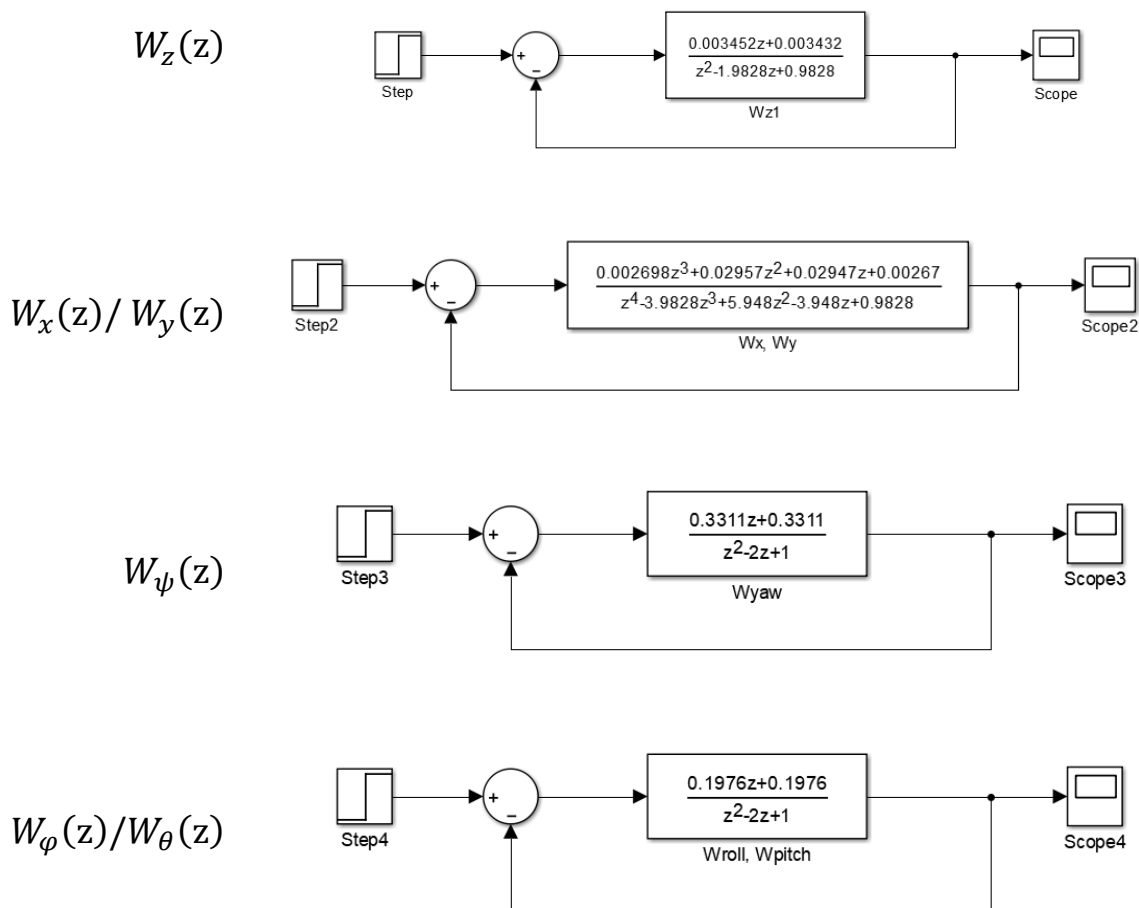
$$\Delta_4 = a_3 \cdot (a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) - a_4 a_1^2 = -0.068286 < 0$$

Всі коефіцієнти характеристичного рівняння (6.31) додатні і визначники Гурвіца також. Отже, можна зробити висновок, що система $W_z(z)$ є стійкою. В усіх інших випадках маємо від'ємні визначники, що свідчить про нестійкість систем $W_x(z), W_y(z), W_\varphi(z), W_\theta(z), W_\psi(z)$.

Отримані значення стійкості систем підтверджують розрахунки виконані в розділі 6.2.1.

6.3 Моделювання цифрової системи в пакеті прикладних програм MATLAB

Скористаємося додатком до пакету прикладних програм MATLAB – Simulink для моделювання системи керування пошуков-рятувальним БПЛА. Передавальні функції (6.6-6.9) задамо за допомогою блоку Discrete Transfer Func з бібліотеки Discrete, що призначена для моделювання дискретних систем, на вхід подамо одиничний сигнал за допомогою блоку Step. Моделі цифрових систем керування координатами x, y, z та кутами φ, θ, ψ пошуково-рятувального БПЛА зображені на рисунку 6.3, а перехідні процеси, що характеризую дані моделі, представлені на рисунку 6.4.



Продовження рисунку 6.3 – Моделі цифрових систем керування координатами x, y, z та кутами φ, θ, ψ пошуково-рятувального БПЛА

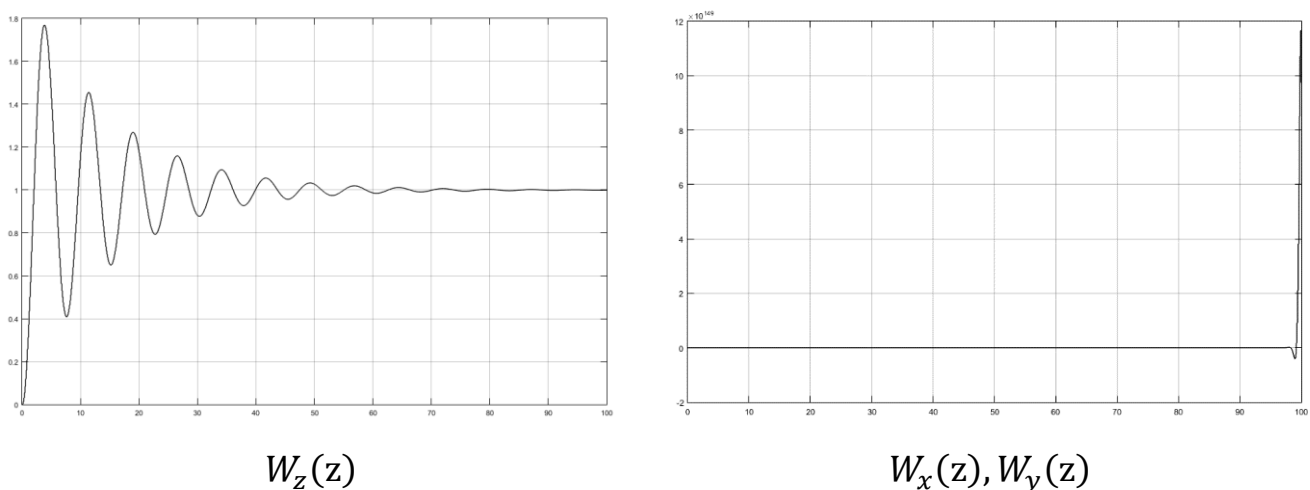
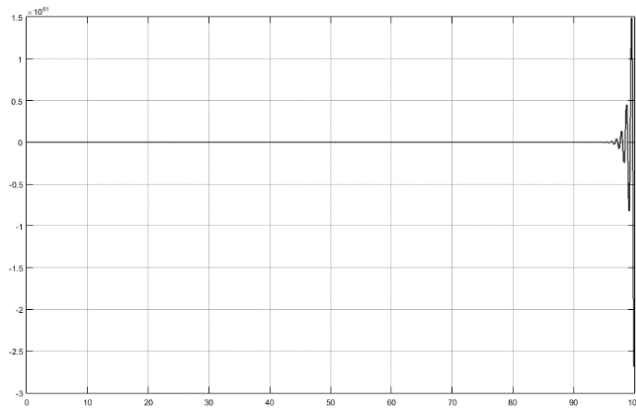
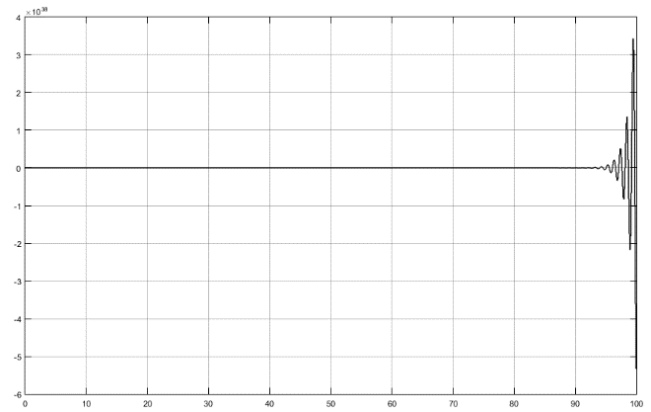


Рисунок 6.4 – Графіки перехідних процесів цифрових систем керування координатами x, y, z та кутами φ, θ, ψ пошуково-рятувального БПЛА



$W_{\psi}(z)$



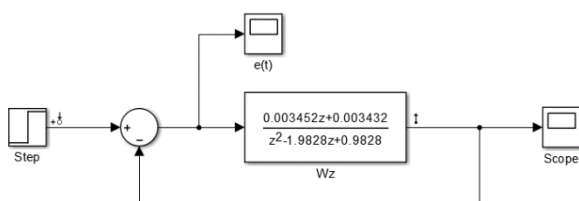
$W_{\varphi}(z), W_{\theta}(z)$

Продовження рисунку 6.4 – Графіки перехідних процесів цифрових систем керування координатами x, y, z та кутами φ, θ, ψ пошуково-рятувального БПЛА

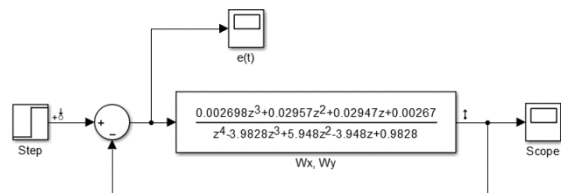
6.4 Аналіз якості цифрової системи

Поведінка в часі цифрової системи управління може бути охарактеризована такими показниками як перерегулювання, час встановлення та час регулювання. Точність цифрової системи у сталому режимі можна визначити використовуючи теорему про кінцеве значення функції.

Застосуємо інструмент LTI Viewer для точного визначення якісних характеристик цифрових систем, моделі яких в пакеті прикладних програм MATLAB зображена на рисунку 6.5 Графіки похибок систем представлені на рисунку 6.6.

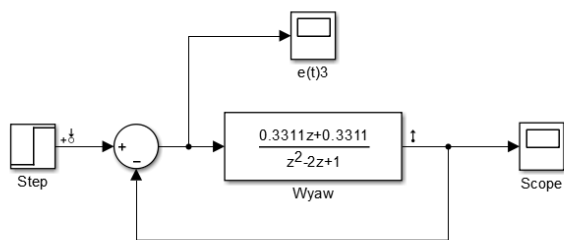


$W_z(z)$

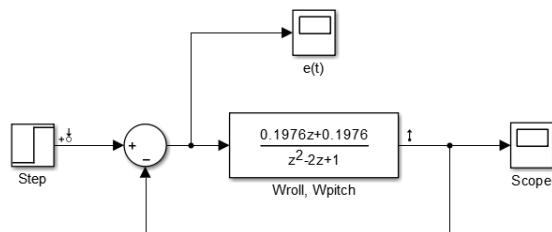


$W_x(z), W_y(z)$

Рисунок 6.5 – Моделі цифрових систем для дослідження якісних характеристик

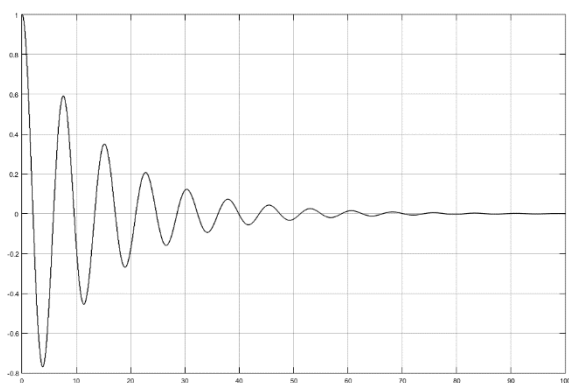


$$W_{\psi}(z)$$

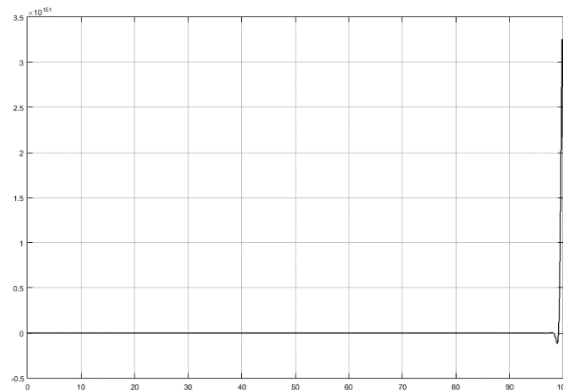


$$W_{\varphi}(z), W_{\theta}(z)$$

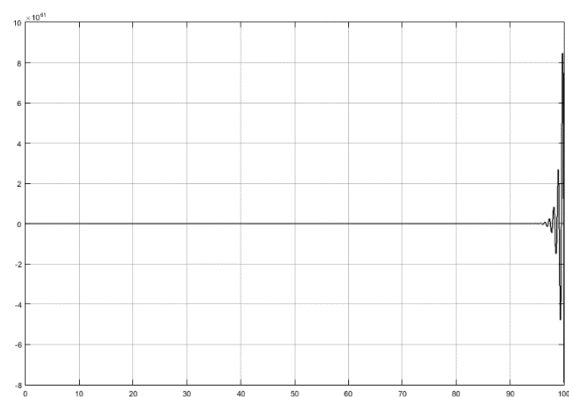
Продовження рисунку 6.5 – Моделі цифрових систем для дослідження якісних характеристик



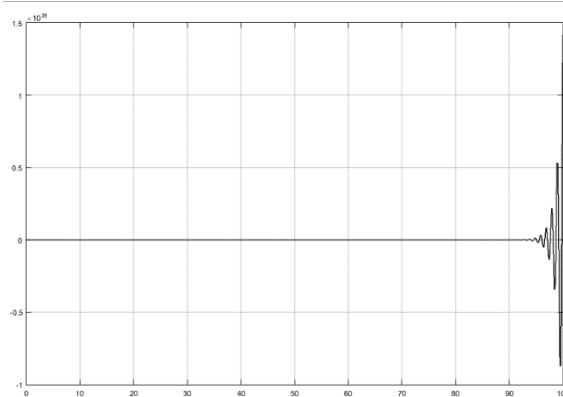
$$E_z(t)$$



$$E_x(t), E_y(t)$$



$$E_{\psi}(t)$$



$$E_{\varphi}(t), E_{\theta}(t)$$

Рисунок 6.6 – Графіки похибок цифрових систем при одиничному впливі

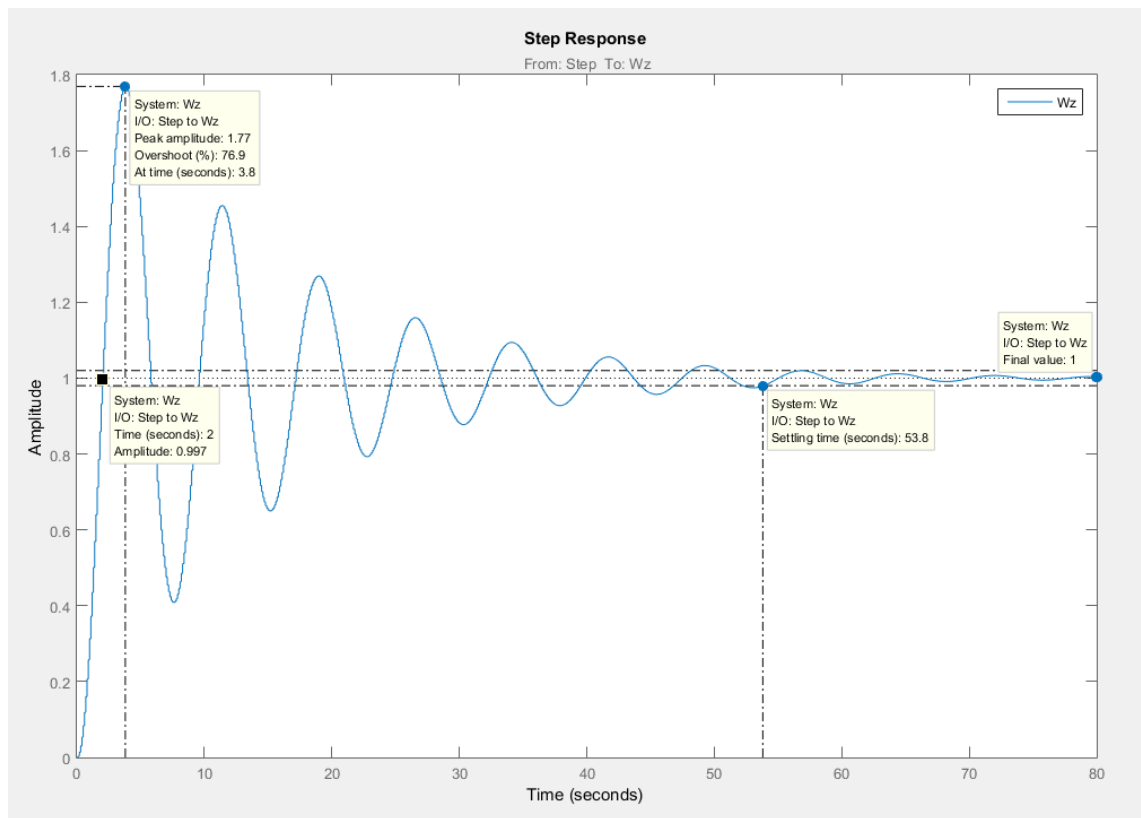


Рисунок 6.7 – Графік перехідного процесу системи $W_z(z)$ в LTI Viewer

Моделі вихідних цифрових систем керування пошуково-рятувальним БПЛА наведені в додатку I, включаючи графіки перехідних процесів та графіки похибок. Аналіз систем керування кутами та положенням пошуково-рятувальним БПЛА показав, що лише система керування висотою є стійкою, проте з погалими показниками якості, усі інші системи – нестійкі (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 – Показники якості цифрових систем

Передавальна функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Час встановлення, с	Стала похибка
$W_z(z)$	76,9	53,8	2	0
$W_x(z), W_y(z)$	нестійка			
$W_\psi(z)$	нестійка			
$W_\varphi(z), W_\theta(z)$	нестійка			

Розрахуємо аналітичне значення сталої похибки. Для цього скористаємося теоремою про кінцеве значення функції [60, 62]:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)E(z). \quad (6.35)$$

Z-перетворення одиничного стрибка:

$$\xi(t) = 1(t), \Xi(z) = Z\{1(t)\} = \frac{z}{z-1}. \quad (6.36)$$

Z-перетворення похибки :

$$E(z) = \Xi(z)(1 - W_3(z)), \quad (6.37)$$

де $W_3(z)$ – передавальна функція замкненої системи.

Підставимо в (6.37) знайдене Z-перетворення одиничного стрибка (6.36) та передавальну функції замкненої системи (6.14).

$$\begin{aligned} E_z(z) &= \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.97911z + 0.985992} \right) = \\ &= \frac{z^3 - 1.9828z^2 + 0.9828z}{(z-1)(z^2 - 1.97911z + 0.985992)} = \frac{z - 0.9828}{(z^2 - 1.97911z + 0.985992)} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Остаточно, підставивши у формулу (6.35) знайдені Z-перетворення похибок $E_z(z)$ та обчисливши ліміт, отримаємо значення сталої похибки:

$$\varepsilon_z(z) = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1) \frac{z - 0.9828}{(z^2 - 1.97911z + 0.985992)} = 0 \cdot \frac{1 - 0.9828}{1 - 1.97911 + 0.985992} = 0$$

Розраховане аналітичним способом значення сталої похибки цифрової системи співпадає з значення на графіку (рисунок 6.7) та дорівнює 0.

7 РОЗРОБЛЕННЯ РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНИМ БПЛА

Проведені в попередньому розділі аналітичні розрахунки, розрахунки за допомогою командного рядка в пакеті прикладних програм MATLAB та моделювання в MATLAB\Simulink, дозволили визначити та проаналізувати якісні характеристики систем керування пошуково-рятувальним БПЛА (таблиця 6.1). Відповідно до задач та вимог, поставлених до роботи систем, характеристики виявились не задовільними, особливо стійкість систем. В результаті чого постає задача покращити роботу систем за допомогою синтезу регулятора.

7.1 Синтез модального регулятора для систем керування кутами БПЛА

Для керування кутами крену, тангажу та рискання пошуково-рятувального БПЛА скористаємося модальним регулятором [63].

Розглянемо лінійний стаціонарний об'єкт, що описується рівнянням

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t), \\ Y(t) &= CX(t).\end{aligned}\tag{7.1}$$

Запишемо, що матриця $C = E$, де E – одинична матриця, так що $Y(t) = X(t)$, припустивши, що всі змінні стану використовуються як вхідні сигнали об'єкта. В результаті регулятор об'єкта отримує на вхід змінні стану об'єкта x_1, x_2, \dots, x_n та виробляє керувальний вплив. Вихідні сигнали регулятора можуть бути подані на об'єкт у тих самих точках, через які можуть подаватися вимірювальні зовнішні впливи $V(t)$.

Тоді повний вплив на об'єкт матиме вигляд

$$U(t) = V(t) - KX(t),\tag{7.2}$$

де K – матриця перетворення регулятора (коефіцієнтів зворотного зв'язку за станом).

Поєднуючи рівняння (7.1) і (7.2), одержимо таке рівняння замкненої системи:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BV(t) - BKX(t) = (A - BK)X(t) + BV(t).\tag{7.3}$$

Якщо в області зображень, за Лапласом, рівняння (7.2) та (7.3) розв'язати відносно $Y(t)$, то одержимо такі матричні передавальні функції об'єкта та замкненої системи:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = (sE - A)^{-1}B. \quad (7.4)$$

Передавальна функція замкненої системи

$$W(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = (sE - A + BK)^{-1}B. \quad (7.5)$$

Структурну схему системи з модальним регулятором зображено на рисунку 7.1.

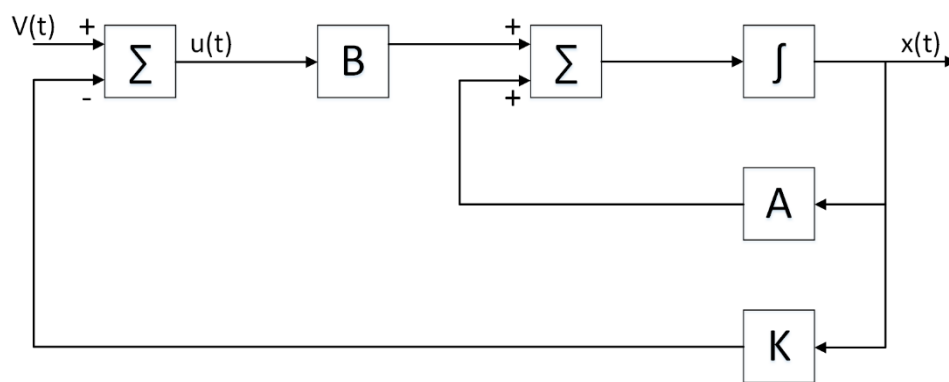


Рисунок 7.1 – Структурна схема моделі синтезованої системи

Синтез модального регулятора полягає у знаходженні матриці K з такими K_1, K_2, \dots, K_n , щоб синтезована система задовольняла необхідним якісним показникам.

Алгоритм розв'язку задачі синтезу модального регулятора.

1. Математичний опис об'єкта керування векторно-матричною моделлю.
2. Аналіз керованості об'єкта.
3. Розрахунок модального регулятора.
 - а) Вибір розмірності матриці $K = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n]$;
 - б) Запис характеристичного рівняння замкненої системи

$$|sE - A + BK| = 0, \quad (7.6)$$

де s – змінні, що набувають значення коренів характеристичного рівняння.

Підставивши відповідні матриці у вираз (7.6), одержимо рівняння, до складу якого входять невідомі коефіцієнти матриці K .

в) Вибираючи відповідним чином k_1, k_2, \dots, k_n , можна домогтися бажаного розподілу коренів замкненої системи.

Скориставшись стандартними формами (біноміальною або Баттерворта), прирівняємо коефіцієнти за однакових ступенів s у характеристичному рівнянні (7.6) й у стандартному характеристичному поліномі:

$$\begin{aligned} n = 1 & \quad s + \omega_0 \\ n = 2 & \quad s^2 + 2s\omega_0 + \omega_0^2 \\ n = 3 & \quad s^3 + 3s^2\omega_0 + 3s\omega_0^2 + \omega_0^3 \end{aligned},$$

або

$$\begin{aligned} n = 1 & \quad s + \omega_0 \\ n = 2 & \quad s^2 + 1.4s\omega_0 + \omega_0^2 \\ n = 3 & \quad s^3 + 2s^2\omega_0 + 2s\omega_0^2 + \omega_0^3 \end{aligned}.$$

За таких обставин одержимо систему рівнянь, з якої можна визначити коефіцієнти зворотного зв'язку.

г) Обчислення кратного кореня ω_0 виконується за графіком реакції на одиничний стрибок стандартних форм із заданим часом перехідного процесу.

Виконаємо синтез модального регулятора для систем (6.8, 6.9) в пакеті прикладних програм MATLAB, враховуючи необхідні показники якості: перерегулювання $\sigma = 5\%$; час перехідного процесу $t_{пп} = 0.5\text{с}$.

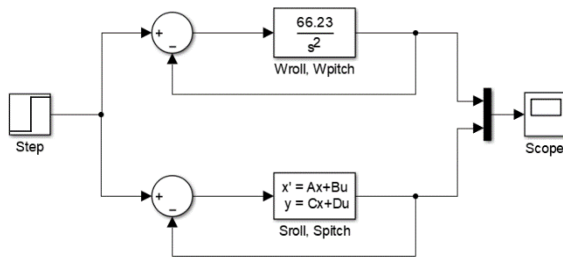
1. Подамо моделі кутів керування змінними простору станів, скориставшись (5.52, 5.54), отримаємо наступні матриці:

$$A_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ 66.23 \end{bmatrix}, C_\varphi = [1 \ 0]; D_\varphi = [0]; \quad (7.7)$$

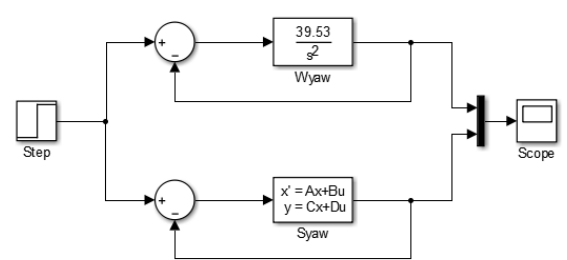
$$A_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 66.23 \end{bmatrix}, C_\theta = [1 \ 0]; D_\theta = [0]; \quad (7.8)$$

$$A_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 39.53 \end{bmatrix}, C_\psi = [1 \ 0]; D_\psi = [0]. \quad (7.9)$$

Схема моделей систем у векторно-матричній формі зображена на рисунку 7.2, графіки перехідних процесів – на рисунку 7.3.

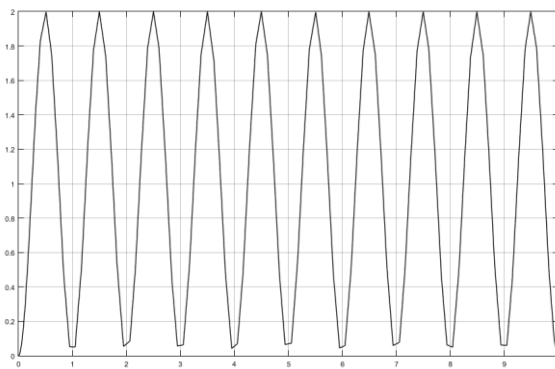


$$W_{\psi}(s)$$

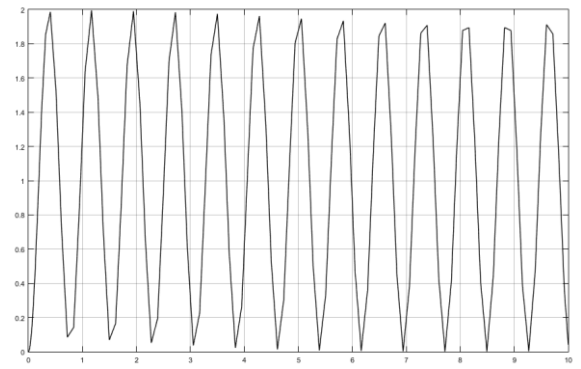


$$W_{\varphi}(s)/W_{\theta}(s)$$

Рисунок 7.2 – Схеми моделей систем керування кутами φ, θ, ψ у векторно-матричній формі



$$W_{\psi}(s)$$



$$W_{\varphi}(s)/W_{\theta}(s)$$

Рисунок 7.3 – Графіки перехідних процесів моделей керування кутами φ, θ, ψ

Як видно з графіків перехідних процесів, системи є нестійкими.

2. Синтез модального регулятора статичних систем

2.1. Дослідження керованості систем

$$\gg A_{roll} = [0 \ 1; 0 \ 0];$$

$$\gg B_{roll} = [0; 66.23];$$

$$\gg A_{yaw} = [0 \ 1; 0 \ 0];$$

$$\gg B_{yaw} = [0; 39.53];$$

Обчислюємо матрицю керованості (рисунок 7.4):

$$\gg P_{roll} = ctrb(A_{roll}, B_{roll});$$

$$P_{roll} = \begin{bmatrix} 0 & 66.23 \\ 66.23 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\gg P_{yaw} = ctrb(A_{yaw}, B_{yaw});$$

$$P_{yaw} = \begin{bmatrix} 0 & 39.53 \\ 39.53 & 0 \end{bmatrix};$$

Обчислюємо ранг матриць керованості:

$$\gg n_{roll} = rank(P_{roll});$$

$$n_{roll} = 2;$$

$$\gg n_{yaw} = rank(P_{yaw});$$

$$n_{yaw} = 2;$$

```

Command Window
>> Ayaw = [0 1; 0 0];
>> Byaw = [0; 39.53];
>> Pyaw = ctrb(Ayaw, Byaw)

Pyaw =

         0    39.5300
    39.5300         0

>> Ryaw = rank(Pyaw)

Ryaw =

     2

```

$W_\psi(s)$

```

Command Window
>> Aroll = [0 1; 0 0];
>> Broll = [0; 66.23];
>> Proll = ctrb(Aroll, Broll)

Proll =

         0    66.2300
    66.2300         0

>> Rroll = rank(Proll)

Rroll =

     2

```

$W_\varphi(s)/W_\theta(s)$

Рисунок 7.4 – Розрахунок матриць керованості для систем керування кутами за допомогою пакету прикладних програм MATLAB

Для кожної матриці керованості, її ранг дорівнює порядку системи, отже, системи повністю керовані.

2.2. Знаходження характеристичного полінома (рисунок 7.5):

```

>> syms s K1 K2 ;
>> SE = [s 0; 0 s];
>> K = [K1 K2];
>> V = SE - Aroll + Broll * K
V =
      s          -1
 [ 66.23K1, 66.23K2 + s]
>> n = det(V)
n = s^2 + 66.23K2s + 66.23K1

```

```

>> syms s K1 K2 ;
>> SE = [s 0; 0 s];
>> K = [K1 K2];
>> V = SE - Ayaw + Byaw * K
V =
      s          -1
 [ 39.53K1, 39.53K2 + s]
>> n = det(V)
n = s^2 + 39.53K2s + 39.53K1

```

(7.10)

```

Command Window
>> syms s K1 K2;
>> SE = [s 0; 0 s];
>> K = [K1 K2];
>> V = SE - Aroll + Broll*K

V =

      s,          -1]
 [ (6623*K1)/100, (6623*K2)/100 + s]

>> n = det(V)

n =

s^2 + (6623*K2*s)/100 + (6623*K1)/100

```

```

Command Window
>> syms s K1 K2;
>> SE = [s 0; 0 s];
>> K = [K1 K2];
>> V = SE - Ayaw + Byaw*K

V =

      s,          -1]
 [ (3953*K1)/100, (3953*K2)/100 + s]

>> n = det(V)

n =

s^2 + (3953*K2*s)/100 + (3953*K1)/100

```

Рисунок 7.5 – Розрахунок характеристичних поліномів для систем керування кутами за допомогою пакету прикладних програм MATLAB

2.3 Знаходження коефіцієнтів K_1, K_2 для кожної системи керування кутами.

У разі біноміального розподілу коренів характеристичний поліном системи другого порядку має такий вигляд:

$$\lambda(s) = s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2. \quad (7.11)$$

Прирівняємо коефіцієнти поліномів (7.10) і (7.11), що стоять з однаковими степенями s , одержимо дві системи:

$$\begin{cases} 66.23K_2 = 2\omega_0 \\ 66.23K_1 = \omega_0^2 \end{cases}; \quad \begin{cases} 39.53K_2 = 2\omega_0 \\ 39.53K_1 = \omega_0^2 \end{cases}. \quad (7.12)$$

Для системи другого порядку значення нормованого часу можна визначити за формулою:

$$\omega_0 t_{\text{пп}} = 4.47,$$

і, знаючи заданий час перехідного процесу $t_{\text{пп}} = 0.5\text{с}$, знаходимо значення ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{4.47}{t_{\text{пп}}} = \frac{4.47}{0.5} = 9.48.$$

Розв'яжемо системи рівнянь (7.12) та одержимо значення матриць K для кожної системи:

$$\begin{cases} 66.23K_2 = 18.96 \\ 66.23K_1 = 89.8704 \end{cases}; \quad \begin{cases} 39.53K_2 = 18.96 \\ 39.53K_1 = 89.8704 \end{cases};$$
$$\begin{cases} K_1 = 1.356944 \\ K_2 = 0.286275 \end{cases}; \quad \begin{cases} K_1 = 2.273473 \\ K_2 = 0.479636 \end{cases}.$$

Моделі систем керування кутами крену/тангажу та рискання пошуково-рятувального БПЛА з модальними регуляторами зображені на рисунках 7.6 та 7.7 відповідно. На рисунках 7.8 та 7.9 наведені графіки перехідних процесів. Результати показників якості цифрової системи занесені до таблиці 7.1. Згідно з отриманих результатів можна зробити висновок, що системи стабілізувалися та мають високі показники якості, проте з'явилася стала похибка.

В додатку І наведена узагальнена характеристика систем керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модальним регулятором.

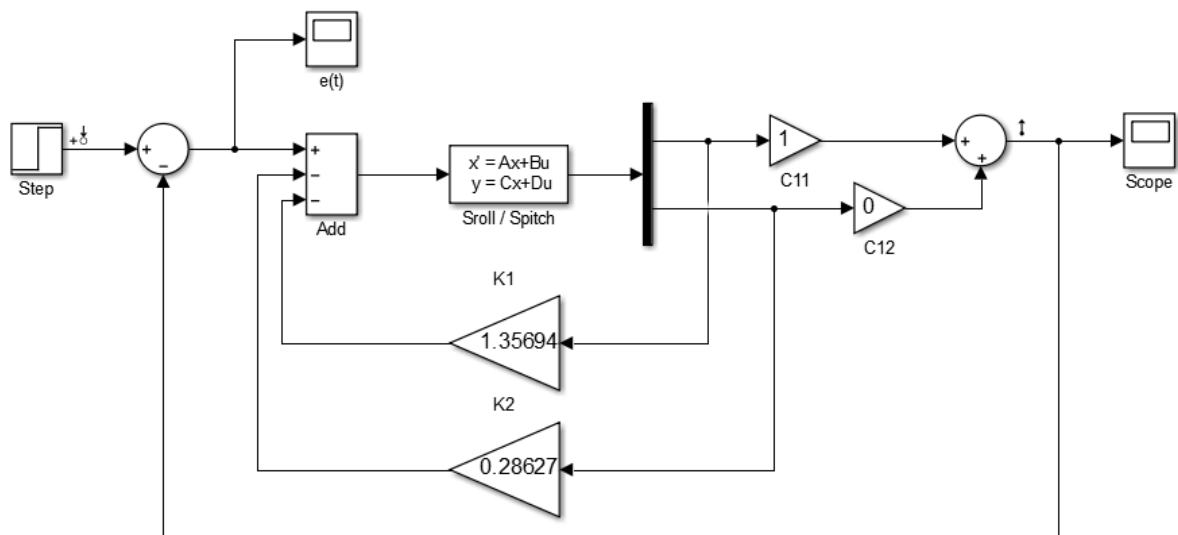


Рисунок 7.6 – Модель системи керування кутом крену/тангажу з модальним регулятором.

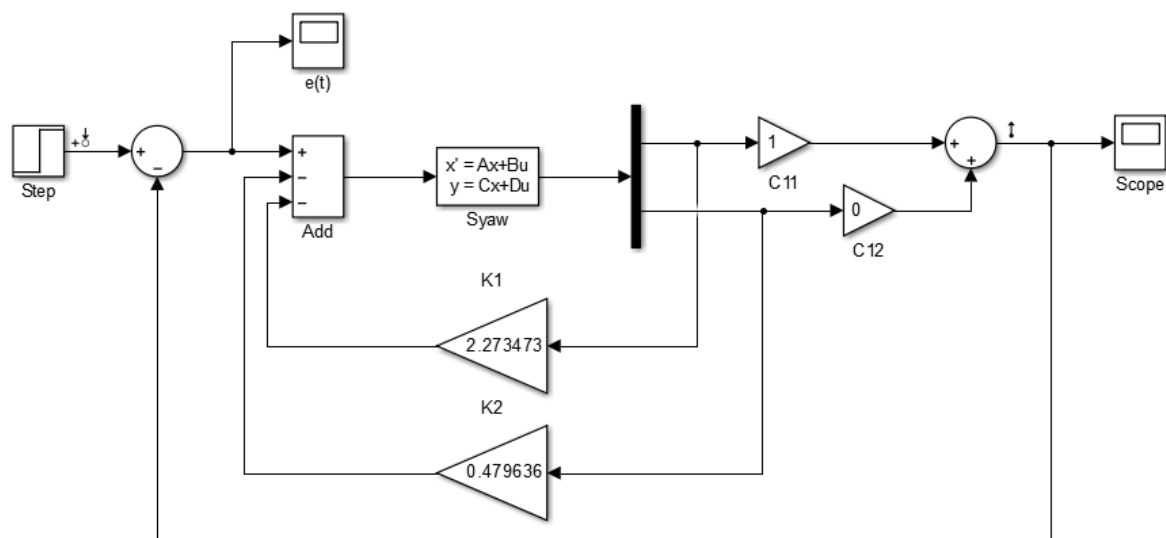


Рисунок 7.7 – Модель системи керування кутом рискання з модальним регулятором.

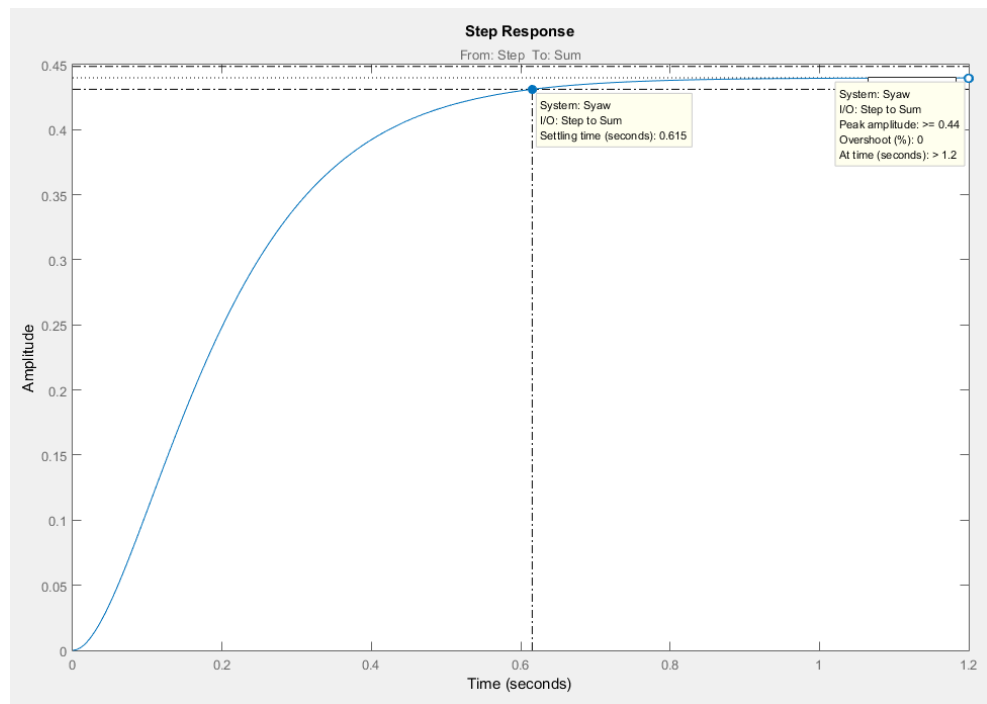


Рисунок 7.8 – Графік перехідного процесу системи керування кутом крену/тангажу з модальним регулятором

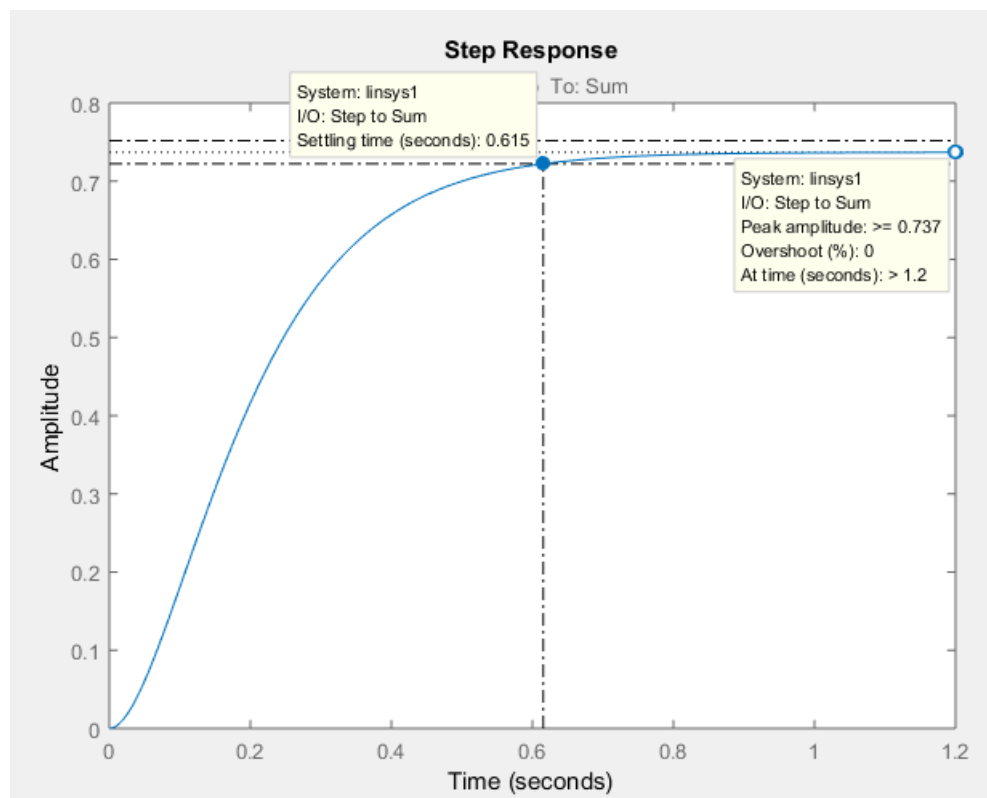


Рисунок 7.9 – Графік перехідного процесу системи керування кутом рискання з модальним регулятором

Таблиця 7.1 – Показники якості систем керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модальним регулятором

Передавальна функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Час встановлення, с	Стала похибка
$W_\psi(z)$	0	1,2	0,615	0,56
$W_\varphi(z)$	0	1,2	0,615	0,263
$W_\theta(z)$	0	1,2	0,615	0,263

7.2 Синтез модифікованого модального регулятора для систем керування кутами БПЛА

Для усунення сталої похибки системи введемо в систему астатизм першого порядку за виходом системи [63].

Для цього введемо інтегруючу ланку в прямий канал керування. Тим самим виділимо негативний зворотній зв'язок за виходом і місцевий зворотний зв'язок за станом. Структурну схему моделі системи другого порядку з модифікованим модальним регулятором показано на рисунку 7.8.

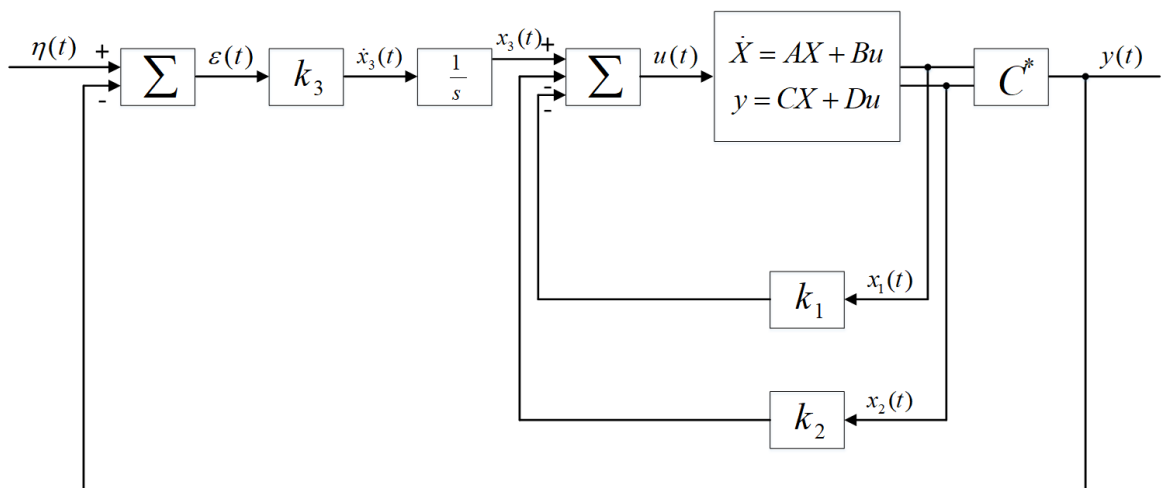


Рисунок 7.10 – Структурна схема моделі системи другого порядку

Нехай у загальному вигляді матриці A, B, C, D позначимо як:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [0], C^* = [c_{11} \quad c_{12}].$$

Потрібно розрахувати матрицю K :

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3].$$

Для знаходження матриці K опишемо роботу замкненої системи за схемою на рисунку 7.8.

Маємо

$$\begin{aligned} u &= x_3 - k_1 x_1 - k_2 x_2; \\ \dot{x}_3 &= k_3(\eta - y) \end{aligned};$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1u \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2u \\ \dot{x}_3 = k_3\eta - k_3c_{11}x_1 - k_3c_{11}x_2 \end{cases}; \quad (7.13)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1x_3 - b_1k_1x_1 - b_1k_2x_2 \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2x_3 - b_2k_1x_1 - b_2k_2x_2 \\ \dot{x}_3 = k_3\eta - k_3c_{11}x_1 - k_3c_{11}x_2 \end{cases}$$

Вираз (7.13) запишемо в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1k_1 & a_{12} - b_1k_2 & b_1 \\ a_{21} - b_2k_1 & a_{22} - b_2k_2 & b_2 \\ -k_3c_{11} & -k_3c_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_3 \end{bmatrix} \eta.$$

Позначимо

$$A^* = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1k_1 & a_{12} - b_1k_2 & b_1 \\ a_{21} - b_2k_1 & a_{22} - b_2k_2 & b_2 \\ -k_3c_{11} & -k_3c_{12} & 0 \end{bmatrix}.$$

Запишемо характеристичне рівняння замкненої системи з модифікованим модальним регулятором.

$$\begin{aligned} [sE - A^*] &= \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} - b_1K_1 & a_{12} - b_1K_2 & b_1 \\ a_{21} - b_2K_1 & a_{22} - b_2K_2 & b_2 \\ -K_3C_{11} & -K_3C_{12} & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} s - a_{11} + b_1K_1 & -a_{12} + b_1K_2 & -b_1 \\ -a_{21} + b_2K_1 & s - a_{22} + b_2K_2 & -b_2 \\ K_3C_{11} & K_3C_{12} & s \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (7.14)$$

$$\begin{aligned} \det(sE - A^*) &= s^3 + s^2(-a_{22} - a_{11} + b_1k_1 + b_2k_2) + \\ &+ s(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} + k_1(a_{12}b_2 - a_{22}b_1) + k_2(-a_{11}b_2 + a_{21}b_1) + \\ &+ k_3(b_1c_{11} + b_2c_{12})) + k_3(c_{11}(a_{12}b_2 - a_{22}b_1) + c_{12}(-a_{11}b_2 + a_{21}b_1)) \end{aligned} \quad (7.15)$$

Подальша методика розрахунку коефіцієнтів регулятора подібна до розглянутої в пункті 7.3.1, тобто прирівнюють коефіцієнти за однакових ступенів s у характеристичному рівнянні (7.15) та бажаному стандартному поліномі.

У загальному вигляді матриця A^* для системи будь-якого порядку з модифікованим модальним регулятором матиме вигляд

$$A^* = \begin{bmatrix} A - BK & B \\ -K_{n+1}C & D \end{bmatrix}, \quad (7.16)$$

де K_{n+1} – коефіцієнт регулятора в прямому каналі керування, n – порядок об'єкта керування.

За виразом (7.14) для систем (5.52, 5.54) запишемо характеристичні рівняння, враховуючи матриці A, B, C (7.7-7.9):

– для кута ристання

$$[sE - A^*] = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 39.53K_1 & s + 39.53K_2 & -39.53 \\ K_3 & 0 & s \end{bmatrix}; \quad (7.17)$$

– для кута крена/тангажа

$$[sE - A^*] = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 66.23K_1 & s + 66.23K_2 & -66.23 \\ K_3 & 0 & s \end{bmatrix}. \quad (7.18)$$

Звідки за (7.15):

– для кута ристання

$$\det(sE - A^*) = s^3 + 39.53K_2s^2 + 39.53K_1s + 39.53K_3; \quad (7.19)$$

– для кута крена/тангажа

$$\det(sE - A^*) = s^3 + 66.23K_2s^2 + 66.23K_1s + 66.23K_3. \quad (7.20)$$

Для системи третього порядку за біноміального розводілу коренів характеристичний поліном має такий вигляд:

$$\lambda(s) = s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3. \quad (7.21)$$

Нормований час перехідного процесу дорівнює

$$\omega_0 t_{\text{пп}} = 6.63.$$

Для заданого часу перехідного процесу $t_{\text{пп}} = 0.5\text{с}$

$$\omega_0 = \frac{6.63}{t_{\text{пп}}} = \frac{6.63}{0.5} = 12.6.$$

Прирівнявши відповідні коефіцієнти поліномів (7.19, 7.20) і (7.21), що стоять при однакових ступенях s , одержимо системи рівнянь:

– для кута рискання

$$\begin{cases} 39.53K_2 = 3\omega_0 \\ 39.53K_1 = 3\omega_0^2 \\ 39.53K_3 = \omega_0^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 39.53K_2 = 37.8 \\ 39.53K_1 = 476.28 \\ 39.53K_3 = 2000.376 \end{cases} ; \quad (7.22)$$

– для кута крена/тангажа

$$\begin{cases} 66.23K_2 = 3\omega_0 \\ 66.23K_1 = 3\omega_0^2 \\ 66.23K_3 = \omega_0^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 66.23K_2 = 37.8 \\ 66.23K_1 = 476.28 \\ 66.23K_3 = 2000.376 \end{cases} . \quad (7.23)$$

Розв'язок систем дає наступні коефіцієнти зворотного зв'язку за станом:

– для кута рискання

$$\begin{cases} K_1 = 12.048571 \\ K_2 = 0.956236 \\ K_3 = 50.603997 \end{cases} ; \quad (7.24)$$

– для кута крена/тангажа

$$\begin{cases} K_1 = 7.191303 \\ K_2 = 0.570738 \\ K_3 = 30.203473 \end{cases} . \quad (7.25)$$

Моделі систем керування кутами крену, тангажу та рискання пошуково-рятувального БПЛА з модифікованими модальними регуляторами зображені на рисунках 7.11 та 7.12 відповідно. На рисунках 7.13 та 7.14 наведені графіки перехідних процесів. Результати показників якості цифрової системи занесені до таблиці 7.2. Згідно з отриманих результатів можна зробити висновок, що стала похибка систем була зведена до нуля, і разом з цим були покращені показники якості.

В додатку К наведена узагальнена характеристика систем керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модифікованим модальним регулятором.

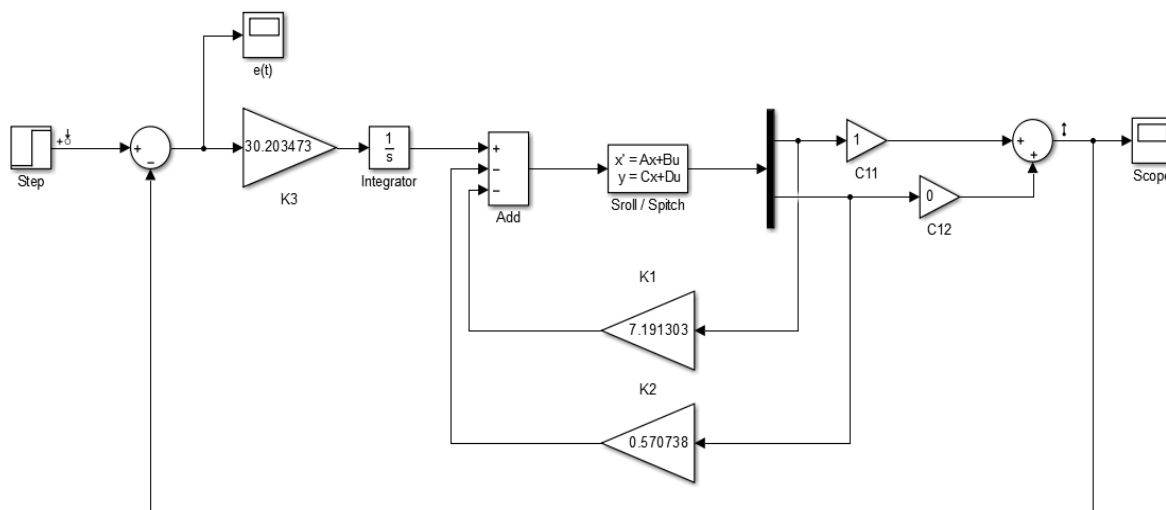


Рисунок 7.11 – Модель системи керування кутом крену/тангажу з модифікованими модальним регулятором.

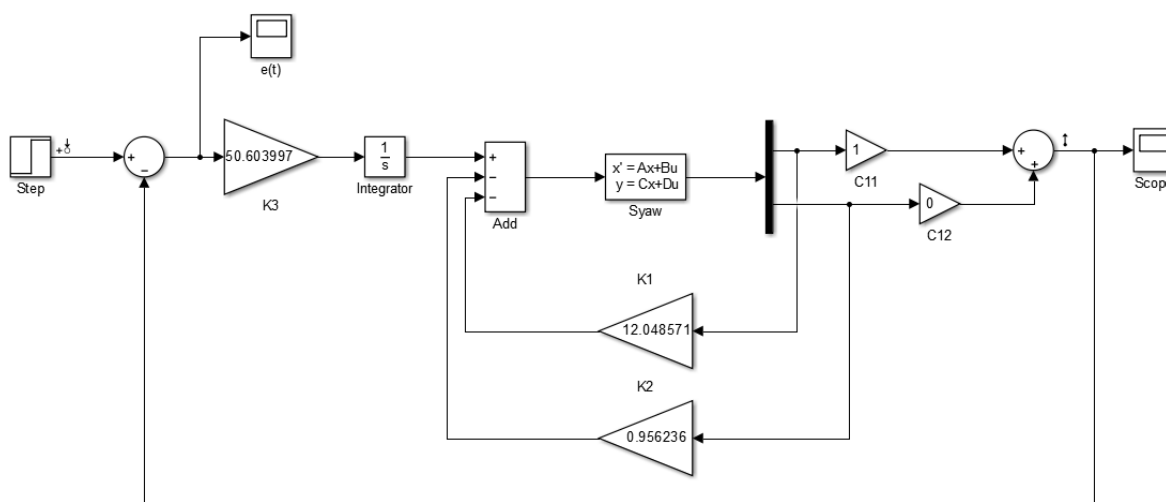


Рисунок 7.12 – Модель системи керування кутом ристання з модифікованими модальним регулятором.

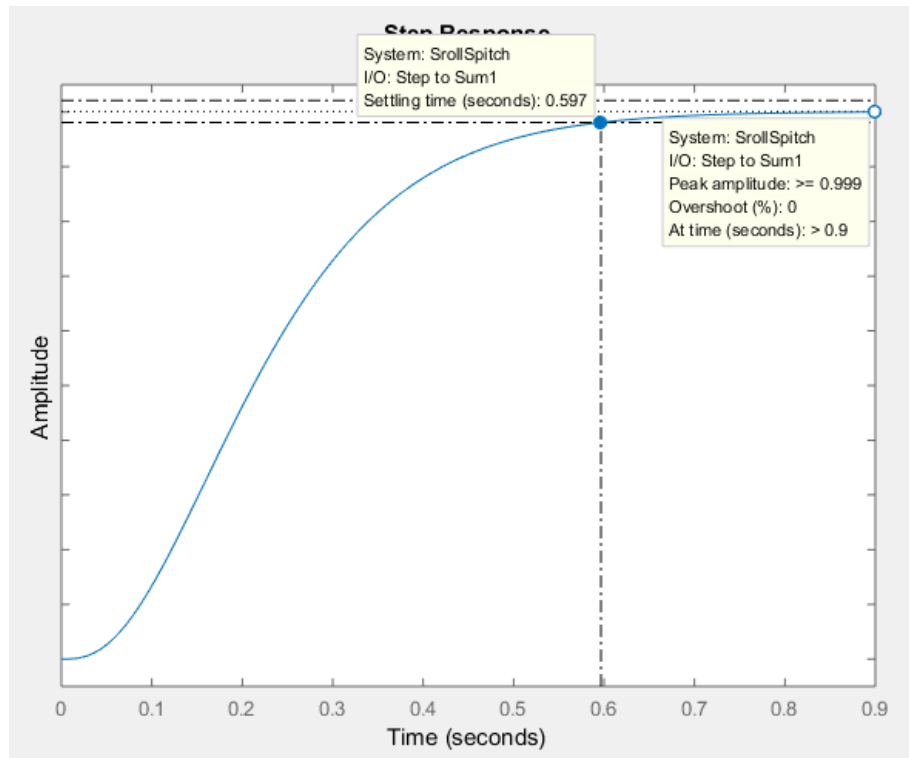


Рисунок 7.13 – Графік перехідного процесу системи керування кутом крену/тангажу з модифікованими модальним регулятором

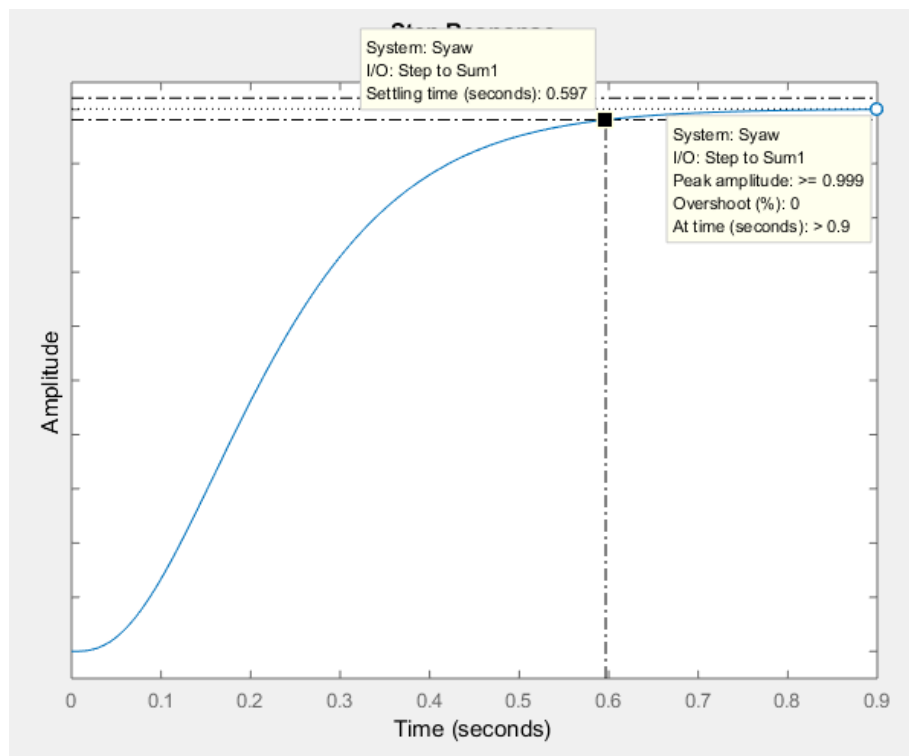


Рисунок 7.14 – Графік перехідного процесу системи керування кутом ристання з модифікованими модальним регулятором

Таблиця 7.2 – Показники якості систем керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модифікованим модальним регулятором

Передавальна функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Час встановлення, с	Стала похибка
$W_\psi(z)$	0	1	0,597	0
$W_\varphi(z)$	0	1	0,597	0
$W_\theta(z)$	0	1	0,597	0

7.3 Синтез цифрового ПД-регулятора для систем керування висотою БПЛА

Одним з найбільш поширених регуляторів в промисловості є ПД-регулятор. Проте зі збільшенням порядку диференціальних рівнянь, що описують динаміку процесів керування, проблематичним стає отримання аналітичних залежностей для розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора. В літературі [64] запропоновано алгоритм розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора на базі білінійного перетворення. Проте в алгоритмі присутній недолік, який припускає перебір рішень.

Далі запропонована удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для синтеза складних цифрових систем керування.

7.3.1 Алгоритм синтезу цифрового ПД-регулятора для складних систем

Розглянемо керований процес, що описується передавальною функцією n -го порядку виду:

$$W(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)(T_2s+1)\dots(T_ns+1)}, \quad (7.26)$$

де K – коефіцієнт підсилення, T – постійна часу.

Визначимо передавальну функцію приведені безперервної частини цифрової системи, використовуючи Z -перетворення:

$$W(z) = \frac{Az^n + Bz^{n-1} + \dots + C}{(z-1)(z-z_1)\dots(z-z_n)}, \quad (7.27)$$

де A, B, \dots, C – коефіцієнти, отримані при переході передавальної функції до цифрового вигляду.

Оскільки у виразі (7.27) присутня інтегрувальна ланка $(z - 1)$, то для компенсації коренів z_1, z_2, \dots, z_n при умові збереження стійкості скомпенсованої системи скористаємося ПнД-регулятор, структурна схема якого зображена на рисунку 7.15.

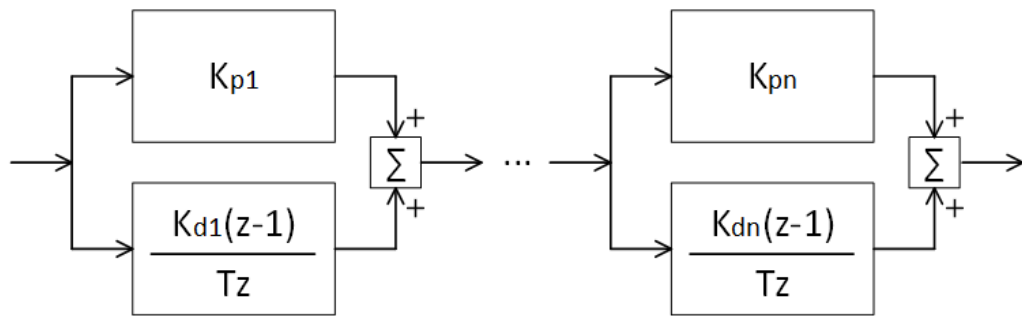


Рисунок 7.15 – Структурна схема ПнД-регулятора

Запишемо залежність між коефіцієнтами кожної дифференціальної ланки та коренями характеристичного полінома у вигляді системи рівнянь:

$$W_{\text{пд}}(z) = K_P + \frac{K_D(z - 1)}{T_0 z} = \frac{z(K_P T_0 + K_D) - K_D}{T_0 z} = \frac{z - \frac{K_D}{K_P T_0 + K_D}}{T_0 z};$$

$$\begin{cases} \frac{K_{D1}}{K_{P1} T_0 + K_{D1}} = z_1 \\ \frac{K_{D2}}{K_{P2} T_0 + K_{D2}} = z_2 \\ \vdots \\ \frac{K_{Dn}}{K_{Pn} T_0 + K_{Dn}} = z_n \end{cases} \quad (7.28)$$

Виразимо скориговану систему через залежність коефіцієнтів підсилення кожної ланки системи, враховуючи (7.28):

$$W_{\text{скор}}(z) = W(z) \cdot W_{\text{пд}}(z) =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{Az^n + Bz^{n-1} + \dots + C}{(z-1)(z-z_1) \dots (z-z_n)} \cdot \frac{z - \frac{K_{D1}}{K_{P1}T_0 + K_{D1}}}{T_0z} \cdot \frac{z - \frac{K_{D2}}{K_{P2}T_0 + K_{D2}}}{T_0z} \dots \\
&\quad \cdot \frac{z - \frac{K_{Dn}}{K_{Pn}T_0 + K_{Dn}}}{T_0z} = \frac{Az^n + Bz^{n-1} + \dots + C}{T_0^n z^n (z-1)}; \\
W_{\text{скор}}(z) &= \frac{Az^n + Bz^{n-1} + \dots + C}{T_0^n z^n (z-1)}. \tag{7.29}
\end{aligned}$$

Позначимо

$$A' = \frac{A}{K}, B' = \frac{B}{K}, \dots, C' = \frac{C}{K}, \tag{7.30}$$

де K — коефіцієнт підсилення з початкової передавальної функції системи (7.26).

Тоді, (7.29) можна переписати як

$$W_{\text{скор}}(z) = \frac{K_{\text{гр}}A'z^n + K_{\text{гр}}B'z^{n-1} + \dots + K_{\text{гр}}C'}{T^n z^n (z-1)}. \tag{7.31}$$

де $K_{\text{гр}}$ — коефіцієнт підсилення, при якому система знаходиться на границі стійкості.

Знайдемо передавальну функцію замкненої системи для $W_{\text{скор}}(z)$:

$$\begin{aligned}
W_{\text{скорзам}}(z) &= \frac{W_{\text{скор}}(z)}{1 + W_{\text{скор}}(z)} = \frac{\frac{K_{\text{гр}}A'z^n + K_{\text{гр}}B'z^{n-1} + \dots + K_{\text{гр}}C'}{T^n z^n (z-1)}}{1 + \frac{K_{\text{гр}}A'z^n + K_{\text{гр}}B'z^{n-1} + \dots + K_{\text{гр}}C'}{T^n z^n (z-1)}} = \\
&= \frac{K_{\text{гр}}A'z^n + K_{\text{гр}}B'z^{n-1} + \dots + K_{\text{гр}}C'}{T^n z^{n+1} + (K_{\text{гр}}A' - T^n)z^n + K_{\text{гр}}B'z^{n-1} + \dots + K_{\text{гр}}C'} = \frac{F(z)}{D(z)}. \tag{7.32}
\end{aligned}$$

Випишемо характеристичний поліном $D(z)$ з (7.32):

$$D(z) = az^{n+1} + bz^n + cz^{n-1} + \dots + d, \tag{7.33}$$

де $a = T^n$; $b = (K_{\text{гр}}A' - T^n)$; $c = K_{\text{гр}}B'$; $d = K_{\text{гр}}C'$.

Перепишемо 7.33 з використанням білінійного перетворення $z = \frac{1+\omega}{1-\omega}$ тоді

$$D(\omega) = a'\omega^{n+1} + b'\omega^n + c'\omega^{n-1} + \dots + d', \tag{7.34}$$

де коефіцієнти a', b', c', \dots, d' залежать від $K_{\text{гр}}$.

Граничний коефіцієнт підсилення $K_{\text{гр}}$ можна розрахувати застосувавши критерій стійкості Гурвіца до (7.34).

Обчисливши значення граничного коефіцієнту $K_{\text{гр}}$, знайдемо коефіцієнти ПД-регулятора, розв'язавши наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \left(K_{P1} + \frac{K_{D1}}{T}\right) \left(K_{P2} + \frac{K_{D2}}{T}\right) \dots \left(K_{Pn} + \frac{K_{Dn}}{T}\right) K = K_{\text{гр}} \\ \frac{K_{D1}}{K_{P1}T + K_{D1}} = z_1; \frac{K_{D2}}{K_{P2}T + K_{D2}} = z_2; \dots; \frac{K_{Dn}}{K_{Pn}T + K_{Dn}} = z_n; \\ K_{P1} + \frac{K_{D1}}{T} = 1; K_{P2} + \frac{K_{D2}}{T} = 1; \dots; K_{Pn-1} + \frac{K_{Dn-1}}{T} = 1 \end{cases} \quad (7.35)$$

де $K_{P1} + \frac{K_{D1}}{T} = 1; K_{P2} + \frac{K_{D2}}{T} = 1; \dots; K_{Pn-1} + \frac{K_{Dn-1}}{T} = 1$ експериментально визначені рівняння.

7.3.2 Розрахунок коефіцієнтів ПД-регулятора для системи керування висотою БПЛА

Передавальна функція системи керування висотою БПЛА:

$$W_z(s) = \frac{0.6944}{s(s+0.1736)}. \quad (7.36)$$

звідки коефіцієнт підсилення $K = 0.6944$.

Передавальна функція приведеної безперервної частини цифрової системи для (7.36):

$$W_z(z) = \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.9828z + 0.9828} = \frac{0.003686z + 0.003192}{(z-1)(z-0.9828)}. \quad (7.37)$$

Запишемо систему для розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора, згідно з (7.35) для системи з порядком $n = 1$ у чисельнику, $T = 0.1\text{с}$:

$$\begin{cases} 0.6944 \left(K_{P1} + \frac{K_{D1}}{0.1}\right) = K_{\text{гр}} \\ \frac{K_{D1}}{0.1K_{P1} + K_{D1}} = 0.9828 \end{cases} \quad (7.38)$$

Знайдемо значення граничного коефіцієнту $K_{\text{гр}}$ за формулами (7.29-7.34).

Запишемо передавальну функцію скорегованої системи для (7.36) за формулою (7.29), $n = 1, T = 0.1\text{с}$:

$$\begin{aligned} A' &= \frac{A}{K} = \frac{0.003686}{0.6944} = 0.005308; \\ B' &= \frac{B}{K} = \frac{0.003192}{0.6944} = 0.004597; \\ W_{z_{\text{скор}}}(z) &= \frac{K_{\text{гр}}A'z + K_{\text{гр}}B'}{Tz(z-1)} = \frac{0.005308K_{\text{гр}}z + 0.004597K_{\text{гр}}}{0.1z(z-1)}. \end{aligned} \quad (7.39)$$

Знайдемо передавальну функцію замкненої системи для $W_{z_{\text{скор}}}(z)$ за формулою (7.32):

$$W_{z_скор_зам}(z) = \frac{0.005308K_{гр}z + 0.004597K_{гр}}{0.1z^2 + (0.005308K_{гр} - 0.1)z + 0.004597K_{гр}}. \quad (7.40)$$

Характеристичний поліном $D(z)$ для $W_{z_скор_зам}(z)$:

$$D(z) = 0.1z^2 + (0.005308K_{гр} - 0.1)z + 0.004597K_{гр}. \quad (7.41)$$

Застосуємо заміну $z = \frac{1+\omega}{1-\omega}$ до (7.41) для білінійного перетворення, отримаємо

$$\begin{aligned} D(\omega) &= 0.1 \left(\frac{1+\omega}{1-\omega} \right)^2 + (0.005308K_{гр} - 0.1) \left(\frac{1+\omega}{1-\omega} \right) + 0.004597K_{гр} = \\ &= \frac{0.1(1+\omega)^2 + (0.005308K_{гр} - 0.1)(1+\omega)(1-\omega) + 0.004597K_{гр}(1-\omega)^2}{(1-\omega)^2} = \\ &= \frac{(0.2 - 0.000731K_{гр})\omega^2 + (0.2 - 0.009194K_{гр})\omega + 0.009905K_{гр}}{(1-\omega)^2}. \end{aligned}$$

Знайдемо граничний коефіцієнт підсилення $K_{гр}$ за допомогою критерію стійкості Гурвіца. Застосуємо окремий випадок критерію Гурвіца для поліному другого ступеня для знаходження граничного коефіцієнта:

$$\begin{cases} a_0 \geq 0 \\ \Delta_1 = a_1 \geq 0 \\ \Delta_2 = a_1 \cdot a_2 = 0 \end{cases},$$

тоді, матимемо

$$\begin{aligned} &\begin{cases} 0.2 - 0.000731K_{гр} \geq 0 \\ \Delta_1 = 0.2 - 0.009194K_{гр} \geq 0 \\ \Delta_2 = (0.2 - 0.009194K_{гр}) \cdot 0.009905K_{гр} = 0 \end{cases}; \\ &\begin{cases} K_{гр} \leq 21.753317 \\ \Delta_2 = (0.2 - 0.009194K_{гр}) \cdot 0.009905K_{гр} = 0 \end{cases}; \\ &\begin{cases} K_{гр} \leq 21.753317 \\ -0.000091K_{гр}^2 + 0.001981K_{гр} = 0 \end{cases}; \\ &\begin{cases} K_{гр} \leq 21.753317 \\ K_{гр} = 0 \\ K_{гр} = 21.753317 \end{cases}. \end{aligned} \quad (7.42)$$

З системи (7.43) маємо, що $K_{гр} = 21.753317$. Підставимо отримане значення в (7.38) та розрахуємо коефіцієнти ПД-регулятора.

$$\begin{cases} 0.6944 \left(K_P + \frac{K_D}{0.1} \right) = 21.753317 \\ \frac{K_D}{0.1K_P + K_D} = 0.9828 \end{cases}; \quad (7.43)$$

$$\begin{cases} 0.6944K_P + 6.944K_D = 21.753317 \\ K_D = 0.09828K_P + 0.9828K_D \end{cases};$$

$$\begin{cases} K_P + 10K_D = 31.326781 \\ 0.0172K_D = 0.09828K_P \end{cases};$$

$$\begin{cases} K_P = 0.538821 \\ K_D = 3.0788 \end{cases};$$

Модель цифровою системи керування висотою пошуково-рятувального БПЛА з цифровим ПД-регулятором зображена на рисунку 7.16 та наведена в додатку Л. Графік перехідного процесу системи представлено на рисунку 7.17 та 7.18, з якого видно, що система керування висотою дрона має високі показники якості (таблиця 7.3).

В додатку Л наведена узагальнена характеристика системи керування висотою пошуково-рятувального БПЛА з цифровим ПД-регулятором.

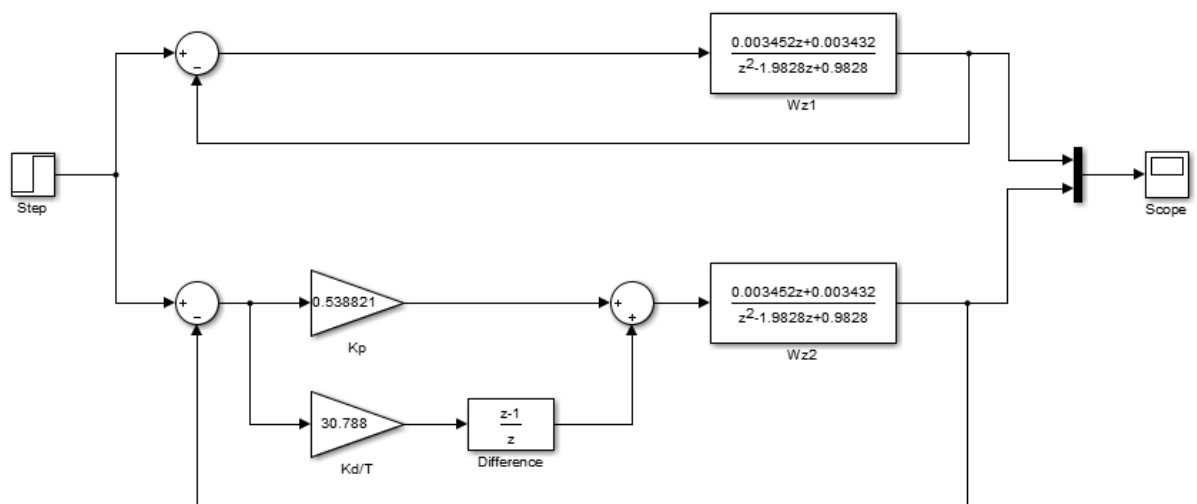


Рисунок 7.16 – Модель системи керування висотою у вихідному вигляді та з ПД-регулятором

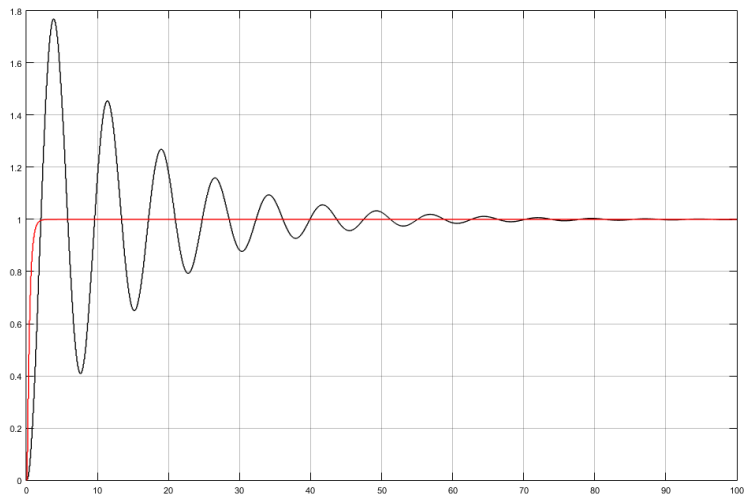


Рисунок 7.17 – Графік перехідного процесу системи керування висотою у вихідному вигляді (чорний) та з ПД-регулятором (червоний)

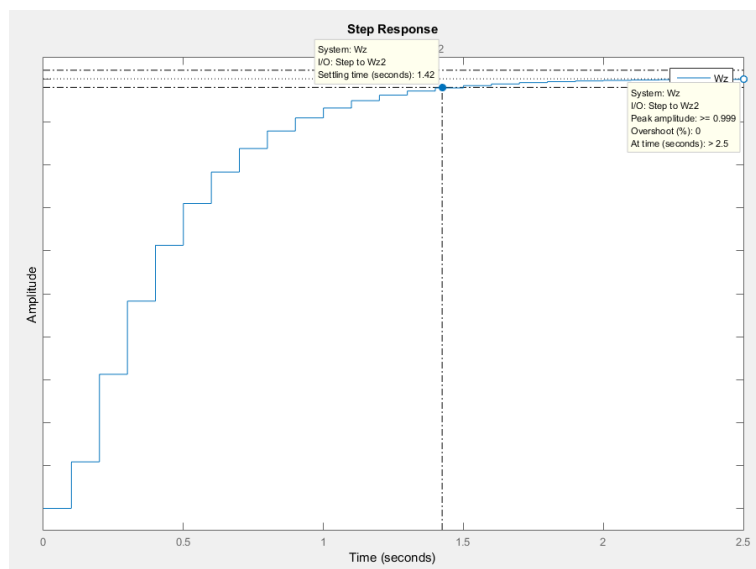


Рисунок 7.18 – Графік перехідного процесу системи керування висотою з ПД-регулятором в LTI Viewer

Таблиця 7.3 – Показники якості системи керування висотою пошуково-регульовального БПЛА з ПД-регулятором

Перерегулювання, %	0
Час регулювання, с	2,5
Час встановлення, с	1,42
Стала похибка	0

8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

8.1 Вступ

Напрацювання, викладені у даній магістерській дисертації, можуть бути практично застосовані і мають комерційну цінність для систем керування безпілотними літальними апаратами. Дана система може бути корисною в першу чергу в сфері безпеки та пошуково-рятувальних операціях. Такі системи лише нещодавно з'явилися на ринку, тому є актуальними та необхідними.

Малі, легкі та верткі БПЛА можуть швидко замінити гелікоптери під час проведення пошуково-рятувальних операцій – дрони можуть проникнути в такі місця, в які гелікоптер буде не в змозі, наприклад, в палаючу будівлю або густий ліс. Безпілотники використовуються для моніторингу ситуації в особливо небезпечних і важкодоступних районах під час стихійних лих для виявлення місць займання полум'я, пошуку постраждалих, доставки медикаментів, продуктів харчування та життєво важливого обладнання. Аерофотозйомка з дронів допомагає фахівцям скорегувати план проведення рятувальної операції, визначити масштаби лиха і отримати точний прогноз, що стосується подальшого розвитку ситуації. Хоча безпілотники поки не можуть повністю замінити авіацію, їх використання дозволяє звести до мінімуму участь людей під час ризикованих операцій.

8.2 Опис ідеї стартап-проекту

В таблиці 8.1 проаналізовано зміст ідеї, що пропонується, можливі напрямки її застосування та основні вигоди, що може отримати користувач товару, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Підвищення ефективності керування БПЛА за рахунок зменшення часу на стабілізацію БПЛА в просторі	1) Розроблення алгоритмів 2) Комплекс ефективних регуляторів керування БПЛА	1) Підвищення ефективності керування БПЛА в режимі польоту 2) Підвищення стабілізації БПЛА в режимі зависання

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів проведений у таблиці 8.2, у якій також було проведено визначення попереднього кола конкурентів, що вже існують на ринку. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Таблиця 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	DJI Mavic 2 Pro	Parrot AR.Drone 2.0 Power Edition	DJI Phantom 4 Pro+			
1	Вартість ПЗ	Середня	Висока	Середня	Висока		✓	
2	Час стабілізації	Низький	Середній	Середній	Середній			✓

Продовження таблиці 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	DJI Mavic 2 Pro	Parrot AR.Drone 2.0 Power Edition	DJI Phantom 4 Pro+			
3	Автоматизація	95%	90%	80%	90%			✓
4	Радіокерування	✓	✓	✓	✓		✓	
5	Керування через Інтернет	✓	✗	✗	✗			✓
6	Автопілот	✓	✓	✓	✓		✓	
7	Корегування маршруту	✓	✓	✗	✓	✓		
8	Розпізнавання образів	✓	✓	✓	✓		✓	
9	Уникнення статичних перешкод	✓	✓	✗	✓		✓	
10	Уникнення рухомих перешкод	✗	✓	✗	✓	✓		
11	4G відео-трансляція	✓	✗	✗	✗			✓
12	Функція повернення	✓	✓	✓	✓		✓	

8.3 Технологічний аудит проекту

У таблиці 8.3 проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 8.4).

Таблиця 8.3 – Технологічна здійсненість ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
Підвищення ефективності керування БПЛА	Реалізація ПД-регулятора у вигляді програми для мікроконтролера	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Реалізація ПД-регулятора у вигляді програми для мікроконтролера			

8.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

В цілому, ринок готовий до сприйняття продукту, і продукт має свою нішу на ринку. Це підтверджується попереднім оглядом ринку, наведеному у таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	5
2	Загальний обсяг продаж, \$/од.	1000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Бар'єри капітальних витрат; Економічні та організаційні; Обмеження на попит; Стратегічні (суб'єктивні) бар'єри.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні на початковому етапі
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	90

Далі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиці 8.5).

Таблиця 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Швидкість та стабільність	Організації з охорони, рятувальні служби, страхові компанії	Гарні технічні характеристики (час регулювання, точність)	Швидка реакція на команди та стабільність при польоті

Продовження таблиці 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
2	Зменшення загрози життю людини			
3	Моніторинг важкодоступних місць			

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 8.6 та 8.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

Фактори	Зміст загроз
Зовнішні	<ul style="list-style-type: none"> – Відсутність попиту в очікуваних обсягах; – скорочення ринків збуту; – збільшення торговельних і митних бар'єрів; – посилення позиції конкурентів; – зростання податкового тиску; – економічна, політична, банківська кризи.

Продовження таблиці 8.6 – Фактори загроз

Фактори	Зміст загроз
Внутрішні	<ul style="list-style-type: none"> – Банкрутство; – погіршення потужностей виробництва; – зниження попиту та реалізації продукції.

Таблиця 8.7 – Фактори можливостей

Фактори	Зміст загроз
Зовнішні	<ul style="list-style-type: none"> – Вихід на нові ринки; – довгострокові контракти на обслуговування великих компаній; – зниження торговельних і митних бар'єрів; – послаблення позицій фірм-конкурентів; – зниження податкового тиску.
Внутрішні	<ul style="list-style-type: none"> – Підвищення попиту на масову продукцію; – підвищення потужностей виробництв; – здійснення нових досліджень і розробок; – підтримка ліквідності і забезпечення прибутковості; – створення інвестиційних можливостей.

Далі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (таблиця 8.8).

Таблиця 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Олігополія	<ul style="list-style-type: none"> – Незначна кількість конкурентів; – велика ринкова сила; – схожість технологій, що використовуються. 	Виробництво продукції з новітніми (дешевими) технологіями
Галузева	<ul style="list-style-type: none"> – Загроза появи нових конкурентів; – ринкова влада споживачів; – висока потреба у товарі схожість технологій, що використовуються.	<ul style="list-style-type: none"> – Інформування ринку щодо якості використання новаторської технології; – пропозиція гнучких цін.
Внутрішньогалузева	<ul style="list-style-type: none"> – Діяльність в одній галузі економіки; – надання сервісів одного типу. 	<ul style="list-style-type: none"> – Зменшення вартості сервісу; – примноження каналів розподілу.
Товарно-видова	Надання різних сервісів одного виду	Маркетингова політика
Цінова	Використання цін для покращення економічних умов збуту	<ul style="list-style-type: none"> – Зменшення вартості сервісу; – використання нових каналів розподілу.

Продовження таблиці 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Марочна	<ul style="list-style-type: none"> – Пропозиція схожого сервісу; – спільна цільова аудиторія. 	<ul style="list-style-type: none"> – Інформування ринку щодо якості використання новаторської технології; – примноження каналів розподілу.

Більш детальний аналіз конкуренції на ринку було виконано за моделлю 5 сил М. Портера, результати наведені у таблиці 8.9.

Таблиця 8.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Dronarium, DJI, Parrot	<ul style="list-style-type: none"> – Капіталовкладення; – існуючі напрацювання в кожній з поєднувальних компонент. 	Відсутні	<ul style="list-style-type: none"> – Системи інформації: реклама та директ-маркетинг; 	<ul style="list-style-type: none"> – Копіювання функціоналу; – монополізація дистриб'юторів; – демпінг.

Продовження таблиці 8.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу				<ul style="list-style-type: none"> – рівень чутливості до цін: орієнтовані на цінність продукту; – продуктова диференціація: якість, спосіб отримання сервісу, швидкість обслуговування; – методи контролю якості: ручне та автоматичне тестування, профілювання, прототипування. 	
Висновки	CR4 = 85% Індекс Херфіндаля-Хіршмана (HHI) = 3450	Можливості входу на ринок забезпечить мінімізація цін, швидкість та простота надавання послуги споживачам	Відсутні	Клієнти диктують умови гнучкості цінової політики, високої і довгострокової якості послуг та підтримку всіх видів документів, що вони використовують	Пропонування вигідних умов безпосереднім користувачам, виділення ліній підтримки

Незважаючи на високу конкуренцію на ринку і наявних на ньому гравців, пропонована система має низку переваг, що описані у таблиці 8.10.

Таблиця 8.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Голосове сповіщення	Можливість передавати та приймати звуковий сигнал на відстані
2	Управління ресурсами	Мінімізація втручання людини
3	Здатність до адаптації	Адаптація до освітленості та погодних умов
4	Управління на відстані	Контроль руху (передача команд) через Інтернет
5	Онлайн-трансляція	Передача відео в реальному часі через Інтернет
6	Планування маршруту	Побудова маршруту між початковою та кінцевою точками на базі GPS даних
7	Підвищення ефективності керування	Ефективне керування за допомогою покращеного регулятора

За визначеними факторами конкурентоспроможності, наведеними у таблиці 8.10, було виконано порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту з іншими підприємствами. Результати аналізу наведені у таблиці 8.11.

Таблиця 8.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з іншими підприємствами
---	-------------------------------	--------------	--

			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Голосове сповіщення	17					✓		
2	Управління ресурсами	18					✓		
3	Здатність до адаптації	15				✓			
4	Управління на відстані	20							✓
5	Онлайн-трансляція	20							✓
6	Планування маршруту	18					✓		
7	Підвищення ефективності керування	20							✓

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу на основі раніше отриманих даних.

SWOT-аналіз полягає у побудові матриці, що включає:

- сильні сторони проекту (Strength);
- слабкі сторони проекту (Weak);
- загрози (Troubles);
- можливості (Opportunities).

На основі SWOT-аналізу були розроблені альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та розрахований орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Результати проведеного SWOT-аналізу наведені у таблиці 8.12.

Таблиця 8.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> – Проект в Україні іноваційний; – багатогалузеве застосування продукту; 	<ul style="list-style-type: none"> – Відсутність фінансування з боку держави; – низька зацікавленість з боку місцевих інвесторів;

<ul style="list-style-type: none"> – відносно невеликий штат організації; – молодий і перспективний колектив; – гнучка політика керівництва. 	<ul style="list-style-type: none"> – відсутність матеріально-технічної бази для реалізації проекту; – брак власного устаткування; – відсутність власного технологічного приміщення; – обмежений сектор використання; – складність просування продукту на ринок.
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> – Реалізація проекту з залученням інвестиційних програм: фандрайзинг, краундфандінг, іноземні інвестори; – розширення виробничої лінії; – вихід на нові ринки; – налагодження роботи з постачальниками інших регіонів; – перехід до екологічності виробництв 	<ul style="list-style-type: none"> – Низька зацікавленість інвесторів; низький темп реалізації проекту; – конкуренція з боку високотехнологічних компаній і виробництв; – збільшення цін на матеріали; – зниження якості матеріалів.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. таблицю 8.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 8.13).

Таблиця 8.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Маркетингова кампанія для приваблювання користувачів	Середня	0,5-1 рік
2	Безкоштовне впровадження системи для одного з користувачів	Середня	1 рік
3	Пошук бізнесів іншої галузі для співпраці	Висока	0,5-1 рік
Обрана альтернатива: пошук бізнесів іншої галузі для співпраці			

8.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 8.14).

Таблиця 8.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Страхові компанії	Середня	60%	Середня	Складно

Продовження таблиці 8.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
2	Рятувальні служби	Вище середнього	70%	Середня	Складно
3	Організації з охорони	Середня	50%	Середня	Просто
Як цільові групи обрано: рятувальні служби та організації з охорони.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) була обрана цільова група – рятувальні служби та організації з охорони. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувані базову стратегію розвитку (таблиця 8.15).

Таблиця 8.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Пошук бізнесів іншої галузі для співпраці або впровадження	Диференційований маркетинг	– Керування на відстані; – голосове сповіщення; – онлайн-трансляція;	Стратегія диференціації

Продовження таблиці 8.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
			– підвищена ефективність керування та стабілізації.	

Обраною базовою стратегією розвитку є стратегія диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність базується на наявності голосового сповіщення, підвищеній ефективності керування та стабілізації, трансляції відео в реальному часі. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 8.16).

Таблиця 8.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Залучати нових	Систему керування БПЛА	Стратегія наслідування лідеру

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. таблицю 8.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 8.15) та стратегії конкурентної поведінки (таблиця 8.16) розробляється стратегія позиціонування (таблиця 8.17), що полягає у формуванні

ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 8.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Зведення до мінімуму участь людей під час ризикованих операцій	Стратегія диференціації	<ul style="list-style-type: none"> – Керування на відстані; – голосове сповіщення; – онлайн-трансляція; – підвищена ефективність керування та стабілізації. 	<ul style="list-style-type: none"> – Пошуково-рятувальний дрон; – Дрон-рятівник; – Безпечний пошуку в небезпечних місцях;

8.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 8.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 8.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Швидкість, стабільність	Висока керованість та стабілізація	Підвищена ефективність керування та стабілізації
2	Спостереження в реальному часі	Онлайн-трансляція	Передача відео через Інтернет в реальному часі
3	Зведення до мінімуму участь людей під час ризикованих операцій	<ul style="list-style-type: none"> – Керування на відстані через Інтернет; – голосове сповіщення. 	Моніторинг та розпізнавання об'єктів в важкодоступних та небезпечних місцях

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 8.19).

Таблиця 8.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Одержання підвищеної керованості та стабілізації БПЛА		
	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Спостережувальність	М	Тх
	2. Керованість	М	Тх
	3. Стійкість	М	Тх
	4. Енергоефективність	Нм	Тл

Продовження таблиці 8.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
--------------	----------------------

	5. Зменшення часу стабілізації	Нм	Тл
	Якість: тестування виконанні в середовищі MatLab		
	Пакування: присутнє		
	Марка: «Drone rescuer»		
	До продажу: спеціальна пропозиція про встановлення системи нашими спеціалістами		
	Після продажу: сервісне обслуговування зі знижкою для великих замовлень		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування та ліцензування			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиці 8.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 8.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	500-1500 \$	1000-2000 \$	10000 \$	1000-1500 \$

Розрахована оптимальна система збуту наведена в таблиці 8.21.

Таблиця 8.21 – Оптимальна система збуту

№	Специфіка закупівельної	Функції збуту, які має	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
---	-------------------------	------------------------	----------------------	--------------------------

	поведінки цільових клієнтів	виконувати постачальник товару		
1	Маркетингова діяльність у сфері поведінки покупців має базуватися на таких принципах: – незалежність покупця; – мотивація і поведінка покупців – об'єкт системного дослідження; – поведінка покупців піддається впливу.	– Функції, пов'язані з угодами; – логістичні функції; – функції обслуговування.	Внутрішня служба збуту – торгові агенти, що виконують свої службові обов'язки безпосередньо в офісі, здійснюють телефонні контакти і приймають замовників і потенційних покупців. Зовнішня служба збуту – зовнішні (польові) торгові агенти, що здійснюють поїздки до замовників.	Оптова торгівля, яка характеризується швидким зростанням обсягів реалізації і прибутку.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 8.22).

Таблиця 8.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфік а поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Ведення діяльності в межах державни х структур	– Телебачення ; – Інтернет.	– Послідовніст ь в реалізації обраної позиції; – доступність та об'єктивність інформації про фірму і товар; – унікальність послуги.	Проінформуват и про можливість застосування БПЛА у пошуково- рятувальних цілях та для моніторингу місцевостей	Раціоналістичн а стратегія реклами

8.7 Висновки

В результаті проведеної розробки стартап-проекту було отримано список очікувань користувачів системи керування пошуково-рятувальним БПЛА, були проведені технологічний аудит та аналіз ринкових можливостей запуску проекту, розроблені ринкова стратегія та маркетингова програма.

В цілому, можливість ринкової комерціалізації проекту є, наявний попит на такого роду системи, динаміка ринку позитивна – ринок зростає. Рентабельність роботи на ринку висока, проте ускладнена високою конкуренцією. Є перспективи впровадження в організаціях з охорони та рятувальних службах. Незважаючи на високу конкуренцію і монополізацію ринку, проект є конкурентоспроможним. Проте через високі стартові капіталовкладення та високу трудомісткість більш перспективною є реалізація ідеї з допомогою інших компаній.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської дисертації була спроектована система керування пошуково-рятувальним безпілотним літальним апаратом, яка забезпечує високу ефективність та керованість.

На сьогоднішній день застосування малогабаритних дронів для пошуково-рятувальних цілей є перспективним напрямком. Головними причинами впровадження дронів в сферу безпеки життєдіяльності є: висока оперативність, що особливо важливо в надзвичайних ситуаціях; економічна ефективність завдяки відносній дешевизні дрона; надійність, оскільки відсутній людський фактор; відсутність або суттєве зниження загрози для життя та здоров'я персоналу тощо.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- проведено огляд предметної області та аналіз сучасних моделей БПЛА;
- розроблено структурну схему системи керування пошуково-рятувальним БПЛА;
- розроблено функціональну схему системи керування пошуково-рятувальним БПЛА;
- розроблено алгоритм автоматичного зльоту, посадки, автономного польоту та патрулювання пошуково-рятувального БПЛА;
- виведено математичну модель системи керування БПЛА;
- проведено моделювання системи керування БПЛА на базі математичної моделі в графічному середовищі MATLAB/Simulink;
- проведено аналіз показників стійкості та якості змодельованої системи керування БПЛА;
- виконано синтез системи керування кутами БПЛА з допомогою модального та модифікованого модального регуляторів;
- виконано синтез системи керування висотою БПЛА з допомогою цифрового ПД-регулятора з використанням удосконаленої формули розрахунку коефіцієнтів.

Під час розроблення системи було виведено математичну модель БПЛА, яка є комплексом із трьох підсистем диференціальних рівнянь для керування положенням дрону, а саме швидкістю, висотою та кутами крену, тангажу та рискання. На основі знайдених систем були побудовані відповідні моделі в графічному середовищі MATLAB/Simulink. Подальше дослідження та аналіз моделей показав, що системи керування кутами є нестійкими, а система керування висотою має погані показники якості (перерегулювання становило 76,9 %, час встановлення – 2 с, а час регулювання – 53,8 с).

Для стабілізації та покращення якісних характеристик системи керування БПЛА було розроблено два види регуляторів.

Синтез системи керування кутами було виконано з допомогою модального регулятора, завдяки якому вдалося перевести систему в стійкий стан та забезпечити високу швидкодію (час регулювання – 1,2 с, час встановлення – 0,615 с) та нульове перерегулювання, проте з'явилася стала похибка (0,56 – для системи керування кутом рискання, 0,263 – для системи керування кутом крену/тангажу). Для її усунення було застосовано модифікований модальний регулятор, який до того ж забезпечив кращі показники якості (перерегулювання – 0 %, час встановлення – 0,597 с, а час регулювання – 1 с).

Для системи керування висотою було розроблено цифровий ПД-регулятор на основі удосконаленої формули розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для складних систем. Даний регулятор складається з одного ПД-ланцюгу, відповідно має просту структуру, та покращує якісні характеристики системи керування висотою (перерегулювання – 0 %, час встановлення – 1,42 с, а час регулювання – 2,5 с), зводячи при цьому значення сталої похибки до нуля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bento M. Unmanned aerial vehicles: An overview [Електронний ресурс] / Maria Bento // Inside GNSS. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.insidegnss.com/auto/janfeb08-wp.pdf>.
2. Портал новостей по аэрокосмической и оборонной тематике [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.shephardmedia.com/news/uv-online>.
3. The Free Dictionary [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.thefreedictionary.com/Unmanned+Aerial+Vehicle>.
4. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. І.Тимочко, Д. Ю. Голубничий, В. Ф. Третьяк, І. В. Рубан. // Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – №1. – С. 61–66.
5. Заблотский А. БПЛА: первое знакомство / А. Заблотский, Р. Ларинцев. // Авиация и время. – 2008. – №2. – С. 15.
6. Ростопчин В. В. Современная классификация беспилотных авиационных систем военного назначения [Електронний ресурс] / В. В. Ростопчин // Интернет-издание UAV.ru – Беспилотная авиация – Режим доступу до ресурсу: <http://uav.ru/articles/bas.pdf>.
7. Панов А. С. Система стабилизации БЛА Квадрокоптера / А. С. Панов, С. П. Чашников. // ФГБОУ «МГТУ им. Н.Э.Баумана». – 2012. – №8.
8. Raffo G. V. An integral predictive/nonlinear PI control structure for a quadrotor helicopter / G. V. Raffo, M. G. Ortega, F. R. Rubio. // Automatica. – 2010. – №46. – С. 29–39.
9. Панов А. С. Система стабилизации БЛА Квадрокоптера / А. С. Панов, С. П. Чашников. // ФГБОУ «МГТУ им. Н.Э.Баумана». – 2012. – №8.
10. Управление квадрокоптером AR.Drone при движении по заданной траектории / [С. А. Белоконь, Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов та ін.] // Труды XIV Международной конференции Проблемы управления и моделирования в сложных

системах / [С. А. Белокопья, Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов та ін.]. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 506–514.

11. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов., 2003. – 752 с.

12. Теория автоматического управления / [В. Н. Брюханов, М. Г. Косов, С. П. Протопопов та ін.], 2000. – 268 с. – (Высшая школа).

13. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления. Учеб. Пособие для вузов. / А. А. Воронов, В. Н. Титов, Б. Н. Новогранов., 1977. – 519 с. – (Высшая школа).

14. Zuo Z. Trajectory tracking control design with command-filtered compensation for a quadrotor / Z. Zuo. // IET Control Theory Appl. – 2010. – №4. – С. 2343–2355.

15. Рейтинг лучших квадрокоптеров с камерой 2018 [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/rejtingi/best-fpv-kvkopteri/>.

16. Обзор квадрокоптера Parrot Bebop Drone 2: гоночная игрушка-акробат [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-parrot-bebop-drone-2-gonochnaya-igrushka-akrobat/>.

17. Обзор квадрокоптера Xiro XPLOER V: медленный дрон для простых съемок [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-xiro-xplorer-v-medlennyj-dron-dlya-prostyh-semok/>.

18. Обзор квадрокоптера Autel Robotics X-Star Premium: яркий дрон для обучения [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-autel-robotics-x-star-premium-yarkij-dron-dlya-obucheniya/>.

19. Обзор квадрокоптера Xiaomi Mi Drone 4K: на слет и в разведку недорогого [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу:

<https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-xiaomi-mi-drone-4k-na-slet-i-v-razvedku-nedorogo/>.

20. Обзор квадрокоптера YUNEEC Typhoon Q500 4K: неторопливая летающая камера [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-yuneec-typhoon-q500-4k-netoroplivaya-letayushhaya-kamera/>.

21. Обзор квадрокоптера DJI Phantom 3 SE: видео в 4K за разумную цену [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-dji-phantom-3-se-video-v-4k-za-razumnuyu-tsenu/>.

22. Обзор квадрокоптера DJI Spark: маленький дрон для прогулок и селфи [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-dji-spark-malenkij-dron-dlya-progulok-i-selfi/>.

23. Обзор квадрокоптера DJI Mavic Air: складная селфи-камера с 4K-видео [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-dji-mavic-air-skladnaya-selfi-kamera-s-4k-video/>.

24. Обзор квадрокоптера DJI Mavic Pro: складная камера средней дальности [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-kvadrokoptera-dji-mavic-pro-skladnaya-kamera-srednej-dalnosti/>.

25. Обзор гексакоптера YUNEEC Typhoon H: репортажи с высоты 4K [Электронный ресурс] // Geeksus. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://geeksus.ru/obzory/obzor-geksakoptera-yuneec-typhoon-h-reportazhi-s-vysoty-4k/>.

26. ArduPilot [Электронный ресурс] // ArduPilot Dev Team. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://ardupilot.org/ardupilot/>.

27. PX4 is an open source flight control software that powers any vehicle from flying drones to ground vehicles. [Электронный ресурс] // PX4 Dev Team. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <http://px4.io/>.

28. MAVLink Developer Guide [Электронный ресурс] // MAVLink. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://mavlink.io/en/>.
29. Autopilot Hardware Options [Электронный ресурс] // ArduPilot Dev Team. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-autopilots.html#common-autopilots>.
30. MPU-9250 Product Specification Revision 1.1 [Электронный ресурс] // InvenSense Inc.. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.
31. iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer [Электронный ресурс] // life.augmented. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00103319.pdf>.
32. NEO-M8 u-blox M8 concurrent GNSS modules Data Sheet [Электронный ресурс] // ublox. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet_%28UBX-13003366%29.pdf.
33. Cortex-M3 Technical Reference Manual [Электронный ресурс] // ARM Limited. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.ddi0337e/DDI0337E_cortex_m3_r1p1_trm.pdf.
34. vision_landing [Электронный ресурс] // Free Software Foundation, Inc.. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: https://github.com/goodrobots/vision_landing.
35. World's Smartest Precision Landing Solution [Электронный ресурс] // flytbase. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://flytbase.com/precision-landing/>.
36. Precision Landing and Loiter with IR-LOCK [Электронный ресурс] // ArduPilot Dev Team.. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://ardupilot.org/copter/docs/precision-landing-with-irlock.html>.
37. Robot vision made easy [Электронный ресурс] // PixyCam. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://pixycam.com/pixy-cmucam5/>.
38. LightWare LW20 [Электронный ресурс] // Acroname Inc.. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://acroname.com/store/r427-lw20b-50?sku=R427-LW20B-50>.

39. VL53L0X [Электронный ресурс] // life.augmented. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>.
40. Real Time Kinematic [Электронный ресурс] // Wikipedia. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Real_Time_Kinematic.
41. PX4FLOW Optical Flow Camera Board Overview [Электронный ресурс] // ArduPilot Dev Team.. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-px4flow-overview.html>.
42. Cortex-M4 [Электронный ресурс] // ARM Developer. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://developer.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4>.
43. GStreamer [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://gstreamer.freedesktop.org/>.
44. SKY DRONE LINK [Электронный ресурс] // Sky Drone. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.skydrone.aero/collections/frontpage/products/sky-drone-link>.
45. FX799T-200MW RP-SMA 40-канальный передатчик Raceband (прямая антенна) [Электронный ресурс] // MicroHobby.ru. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://microhobby.ru/fx799t-200mw-rp-sma-40-kanalnyy-peredatchik-raceband-pryamaya-antenna>.
46. FrSky D4R-II 2.4G 4CH ACCST Telemetry Receiver for RC Drone FPV Racing [Электронный ресурс] // Banggood. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: https://www.banggood.com/FrSky-D4R-II-24G-4CH-ACCST-Telemetry-Receiver-p-929069.html?cur_warehouse=CN.
47. Tarot Gimbal User Manual vA [Электронный ресурс] // Robotics, Inc.. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/A1UCTreLIAS.pdf>.
48. Luukkonen T. Modelling and Control of Quadcopter [Электронный ресурс] / T. Luukkonen // School of Science, Espoo. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf.
49. Мартынов А. К. Экспериментальная аэродинамика / А. К. Мартынов., 1950. – 479 с.

50. Beard R. W. Quadrotor Dynamics and Control [Электронный ресурс] / R. W. Beard // Brigham Young University. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: <http://rwbclasses.groups.et.byu.net/lib/exe/fetch.php?media=quadrotor:beardsquadrotornotes.pdf>.
51. AMELIN K. Recursive Identification of Motion Model Parameters for Ultralight UAV / K. AMELIN, S. TOMASHEVICH, B. ANDRIEVSKY // IFAC Proceedings Volumes / K. AMELIN, S. TOMASHEVICH, B. ANDRIEVSKY., 2015. – С. 7–12.
52. Макаров И. М. Интел-лектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько. // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – №2. – С. 29–36.
53. Сафонов А. А. Численное моделирование сложных маневров вертолета и анализ выполнения полетных заданий с учетом рельефа местности : дис. канд. / Сафонов А. А. – Казань, 2009. – 138 с.
54. Jolliffe I. T. Principal Component Analysis / I. T. Jolliffe., 2002.
55. Борцов Ю. А. Глава 8. Адаптивно-модальное управление в следящих системах с бесконтактными моментными двигателями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский., 1992. – 288 с. – (Автоматизированный электропривод с упругими связями; вып. 2).
56. Tanner O. Modeling, Identification and Control of Autonomous Helicopters / O. Tanner. // ETHZ. – 2003.
57. Pounds P. Towards dynamically-favourable quad-rotor aerial robots / P. Pounds. // Proc. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA'04). – 2004.
58. Куршев Н. В. Оптимальные задачи динамики полета. 2-е изд. доп. и перераб. / Н. В. Куршев, Ю. В. Кожевников. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. – 326 с.
59. Fay G. Derivation of the aerodynamic forces for the mesicopter simulation / G. Fay. – 2001.

60. Теорія автоматичного управління – 2. Теорія цифрових систем управління: Метод. вказівки до виконання лаб. робіт для студентів усіх форм навчання напряму 6.050201 “Системна інженерія” / Уклад.: Н.Б.Репнікова, А.В.Писаренко. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 67с.

61. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие для вузов. - СПб.: Питер, 2005. - 336 с.

62. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Сучасна теорія автоматичного управління – 3. Синтез сучасних систем управління» для студентів спеціальності 8.05020101 «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика» Уклад.: Н.Б.Репнікова, А.В.Писаренко, Т.Й.Лукіна. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 68 с.

63. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підруч. / Н. Б. Репнікова. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с. – 1000 пр.

64. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления : Пер. с англ. – М., Машиностроение, 1986. – С. 448.

ДОДАТОК А

Перелік опублікованих матеріалів

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗМІСТУ ОСВІТИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**SUMMER
INFOCOM
ADVANCED
SOLUTIONS 2018**

МАТЕРІАЛИ

**VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

З ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

CONFERENCE PROCEEDINGS

6th SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

КИЇВ, УКРАЇНА

20-21 ТРАВНЯ 2018 РОКУ

УДК 004

Редакційна колегія:

Бідюк П.І., д.т.н., проф., ІПСА, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
Павлов О.А., д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
Теленик С.Ф., д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
Грішин І.Ю., д.т.н., проф., Кубанський державний технологічний університет, Російська Федерація

Головний редактор:

Писаренко А.В., к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Summer InfoCom 2018: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції з інформаційних систем та технологій, м. Київ, 20-21 травня 2018 р. – К.: Вид-во ТОВ "Інжиніринг", 2018. – 82с. – Мови укр., рос., англ.

Конференція входить до Переліку міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій здобувачів вищої освіти та молодих учених у 2018 році.

Проведення конференції регламентоване наказом ректора КПІ ім. Ігоря Сікорського № 3/204 від 20 квітня 2018 р.

Усі права застережено. Передруки та переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції. За достовірність фактів, цитат, назв та іншої інформації несуть відповідальність автори.

Редакційна колегія дотримується прийнятих міжнародною спільнотою принципів публікаційної етики, відображених, зокрема, в рекомендаціях Комітету з етики наукових публікацій (Committee on Publication Ethics, COPE), а також враховує досвід авторитетних міжнародних видавництв. Щоб уникнути недобросовісної практики в публікаційній діяльності (плагіат, виклад недостовірних відомостей та ін.), з метою забезпечення високої якості наукових публікацій, визнання громадськістю отриманих автором наукових результатів, кожен член редакційної колегії, автор, рецензент, видавець, а також установи, які беруть участь в видавничому процесі, зобов'язані дотримуватися етичних стандартів, норм і правил та вживати всіх можливих заходів для запобігання їх порушень. Дотримання правил етики наукових публікацій усіма учасниками цього процесу сприяє забезпеченню прав авторів на інтелектуальну власність, підвищенню якості видання і виключення можливості неправомірного використання авторських матеріалів в інтересах окремих осіб.

ISBN 978-966-2344-65-3

Удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для синтезу складних систем

Нагайко Дмитро
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
nagayko.dima@gmail.com

Репнікова Наталія
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
n.repnikova@gmail.com

Анотація. Розглянуті проблеми синтезу складних цифрових систем керування з ПД-регулятором. Пропонується удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для цифрових систем керування, динаміка яких описується рівняннями високих порядків. Проведені експериментальні дослідження на моделях з використанням програмного пакета MATLAB/Simulink. Підтверджені адекватність та доцільність запропонованої формули.

Ключові слова: синтез, керованість, час перехідного процесу, ПД-регулятор.

ВСТУП

Сьогодні інформаційні системи (ІС) займають одне з найважливіших місць в розвитку будь-якого промислового підприємства. Впровадження ІС на підприємстві та подальше її вдосконалення надає ряд значних переваг, таких як, автоматизація виробництва, підвищення конкурентоспроможності, підвищення якості та кількості продукції, зменшення витрат, збільшення прибутку тощо.

Одним з ключових етапів впровадження ІС на підприємстві є автоматизація процесів керування конкретними технічними об'єктами чи параметрами технологічного процесу. Тому, розроблення удосконалених алгоритмів цифрового керування різними об'єктами – задача актуальна та своєчасна.

Одним з найбільш поширених регуляторів в промисловості є ПД-регулятор [1]. Проте зі збільшенням порядку диференціальних рівнянь, що описують динаміку процесів керування, проблематичним стає отримання аналітичних залежностей для розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора. В літературі [1] запропоновано алгоритм розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора на базі білінійного перетворення. Проте в алгоритмі присутній недолік, який припускає перебір рішень.

В роботі пропонується вдосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПД-регуляторів для синтезу складних цифрових систем керування.

ПОСТАНОВКА ТА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ

Розглянемо керований процес, що описується передавальною функцією n-го порядку виду:

$$W(s) = \frac{K_w}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)}, \quad (1)$$

де K_w – коефіцієнт підсилення передавальної функції керованого процесу.

Або якщо перейти до Z-перетворення, отримаємо передавальну функцію об'єкта керування у цифровому вигляді:

$$W(z) = \frac{Az^n + Bz^{n-1} + \dots + C}{(z-1)(z-z_1) \dots (z-z_n)} \quad (2)$$

Оскільки у виразі (2) присутня інтегральна ланка $(z-1)$, то для компенсації коренів z_1, z_2, \dots, z_n при умові збереження стійкості скомпенсованої системи буде використаний ПнД-регулятор, структурна схема якого зображена на рис. 1.

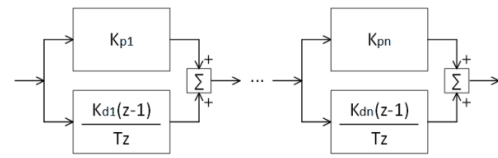


Рис. 1. Структурна схема ПнД-регулятора

Алгоритм визначення коефіцієнтів ПнД-регулятора:

1. Визначення граничного коефіцієнта підсилення передавальної функції керованого процесу K_b .

1.1 Визначення передавальної функції скоректованої системи $W_c(z)$:

$$W_c(z) = \frac{K_b A' z^n + K_b B' z^{n-1} + \dots + K_b C'}{T^n z^n (z-1)}, \quad (3)$$

$$\text{де } A' = \frac{A}{K_w}, B' = \frac{B}{K_w}, \dots, C' = \frac{C}{K_w}.$$

1.2 Визначення характеристичного поліному $D(z)$:

$$D(z) = z^{n+1} + az^n + bz^{n-1} + \dots + c \quad (4)$$

З урахуванням білінійного перетворення $z = \frac{1+\omega}{1-\omega}$:

$$D(\omega) = a'\omega^{n+1} + b'\omega^n + c'\omega^{n-1} + \dots + d' \quad (5)$$

де коефіцієнти при степенях ω (a', b', c', \dots, d') залежать від K_w .

1.3 Застосування критерію стійкості Гурвіца до (4) та розрахунок K_b .

2. Остаточна система рівнянь для розрахунку коефіцієнтів ПнД-регулятора матиме вигляд:

$$\begin{cases} \left(K_{p1} + \frac{K_{D1}}{T}\right) \left(K_{pn} + \frac{K_{Dn}}{T}\right) K_w = K_b \\ \frac{K_{D1}}{K_{p1}T + K_{D1}} = z_1; \quad \frac{K_{Dn}}{K_{pn}T + K_{Dn}} = z_n \\ K_{p1} + \frac{K_{D1}}{T} = 1; \quad K_{pn-1} + \frac{K_{Dn-1}}{T} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

ПРИКЛАД

Нехай задана передавальна функція неперервної системи 3-го порядку виду:

$$W(s) = \frac{3,5}{0,25s^3 + 1,2s^2 + s}, T = 0,2c$$

Виконаємо перехід до Z-перетворення, та отримаємо передавальну функцію системи керування у цифровому вигляді:

$$W(z) = \frac{0,014784z^2 + 0,047124z + 0,009142}{(z-1)(z-0,806807)(z-0,47457)}$$

Розрахуємо граничний коефіцієнт K_b за формулами (3-5) та критерієм стійкості Гурвіца, отримаємо:

$$K_b = 2,5301$$

Розв'яжемо систему рівнянь (5), підставивши в неї K_b :

$$K_{p1} = 0,193193, K_{p2} = 0,37982584$$

$$K_{D1} = 0,1613614, K_{D2} = 0,06861197$$

Модель початкової цифрової системи керування та цифрової системи керування з ПнД-регулятором представлена на рис. 2. Графіки перехідних процесів зображені на рис. 3.

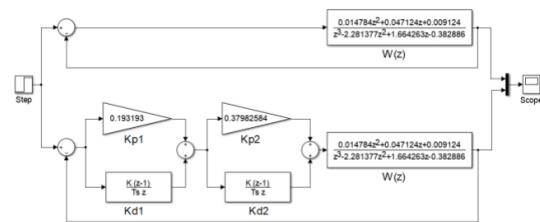


Рис. 2. Модель цифрової системи керування з ПнД-регулятором та без нього в програмному пакеті MATLAB/Simulink

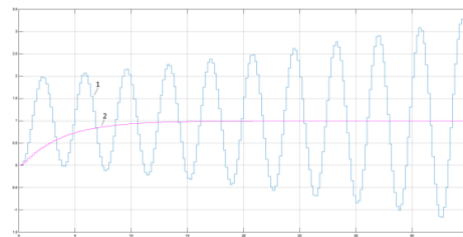


Рис. 3. Графіки перехідних процесів цифрової системи: 1 – без ПнД-регулятора, 2 – з ПнД-регулятором

Показники якості перехідного процесу системи з ПнД-регулятором наступні: $t_{\text{уст}} = 23c, \delta = 0\%$.

ВИСНОВКИ

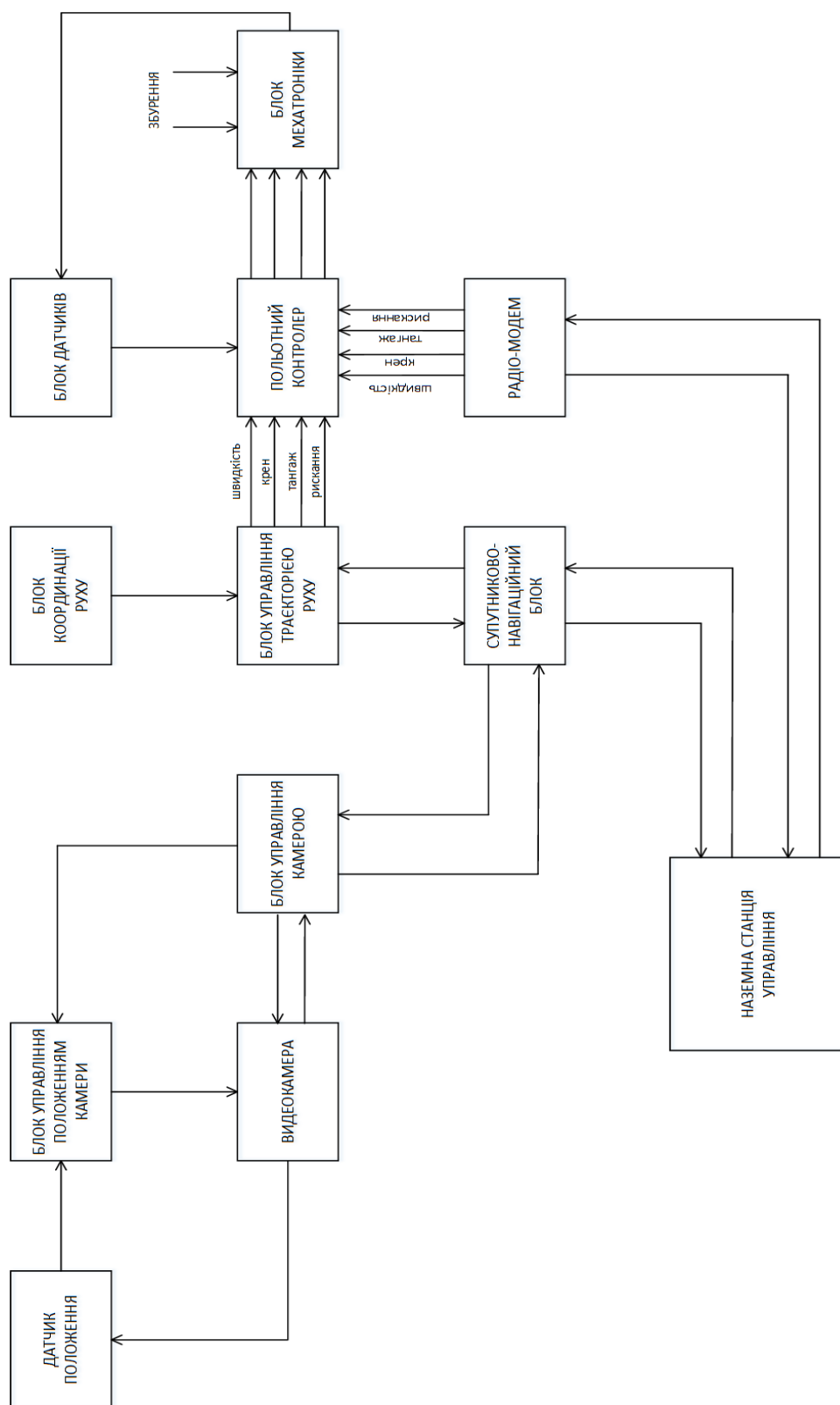
Таким чином, запропонована удосконалена формула розрахунку коефіцієнтів ПнД-регуляторів для синтезу складних цифрових систем керування. Це дозволить не тільки стабілізувати систему, але і покращить якість перехідного процесу (звести до нуля перерегулювання, зменшити час перехідного процесу).

ЛІТЕРАТУРА

1. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления : Пер. с англ. – М., Машиностроение, 1986. – С. 448.
2. Репнікова Н.Б. Синтез цифрових систем управління з ПнД – регуляторами / Н.Б. Репнікова, В.Ю. Федулова, Т.Я. Богдодорова. // Системи обробки інформації. – 2009. – №7(74). – С. 55-59

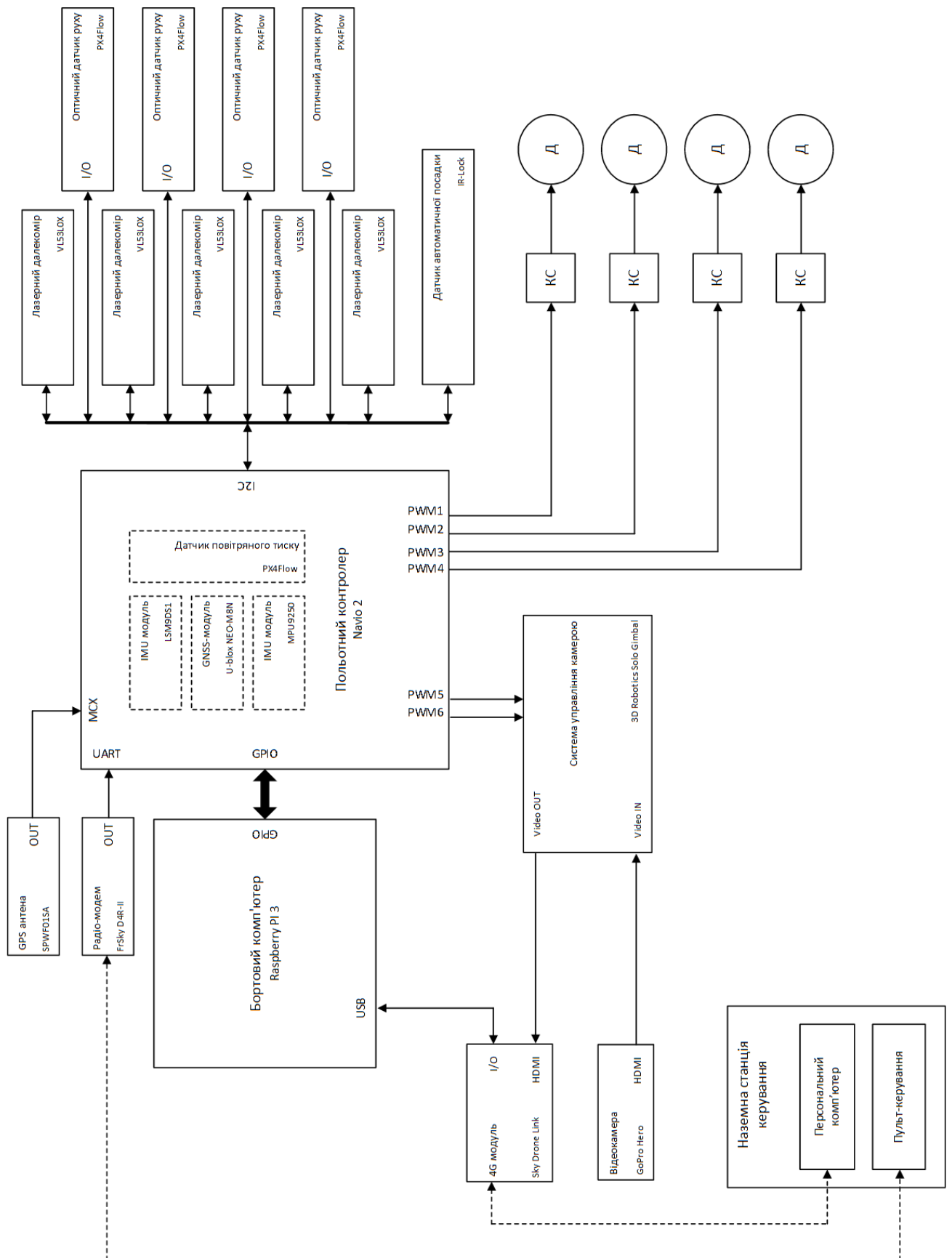
ДОДАТОК Б

Структурна схема системи керування пошуково-рятувальним БПЛА



ДОДАТОК В

Функціональна схема системи керування пошуково-рятувальним БПЛА



ДОДАТОК Г

Порівняльна характеристика польотних контролерів

№	Польотний контролер	Бортовий комп'ютер	Процесори, к-сть	Комплект IMU датчиків, к-сть	Датчик повітряного тиску, к-сть	GPS/ГЛОНАСС	Відеовхід	Wi-Fi	Резервне живлення, к-сть	Вага, г	Вартість, \$
1	Erle PXFMini	Raspberry Pi Zero W	1	1	1	зовнішній модуль з додатковим магнітометром	CSI на Raspberry Pi	+	0	84	212
2	Emlid Edge	не додається	2	2	2	зовнішній модуль з додатковим магнітометром	HDMI	+	2	97	700
3	Navio 2	Raspberry Pi 3	2	2	1	вбудований приймач, зовнішня антена	CSI на Raspberry Pi	+	3	98	215
4	Erle Brain 3	не додається	1	1	1	зовнішній модуль з додатковим магнітометром	CSI	+	0	145	341
5	PixHawk 2 Cube	Raspberry Pi 3	3	3	1	зовнішній модуль	CSI на Raspberry Pi	+	2	150	331

ДОДАТОК Д

Алгоритми автоматичного зльоту та посадки пошуково-рятувального БПЛА

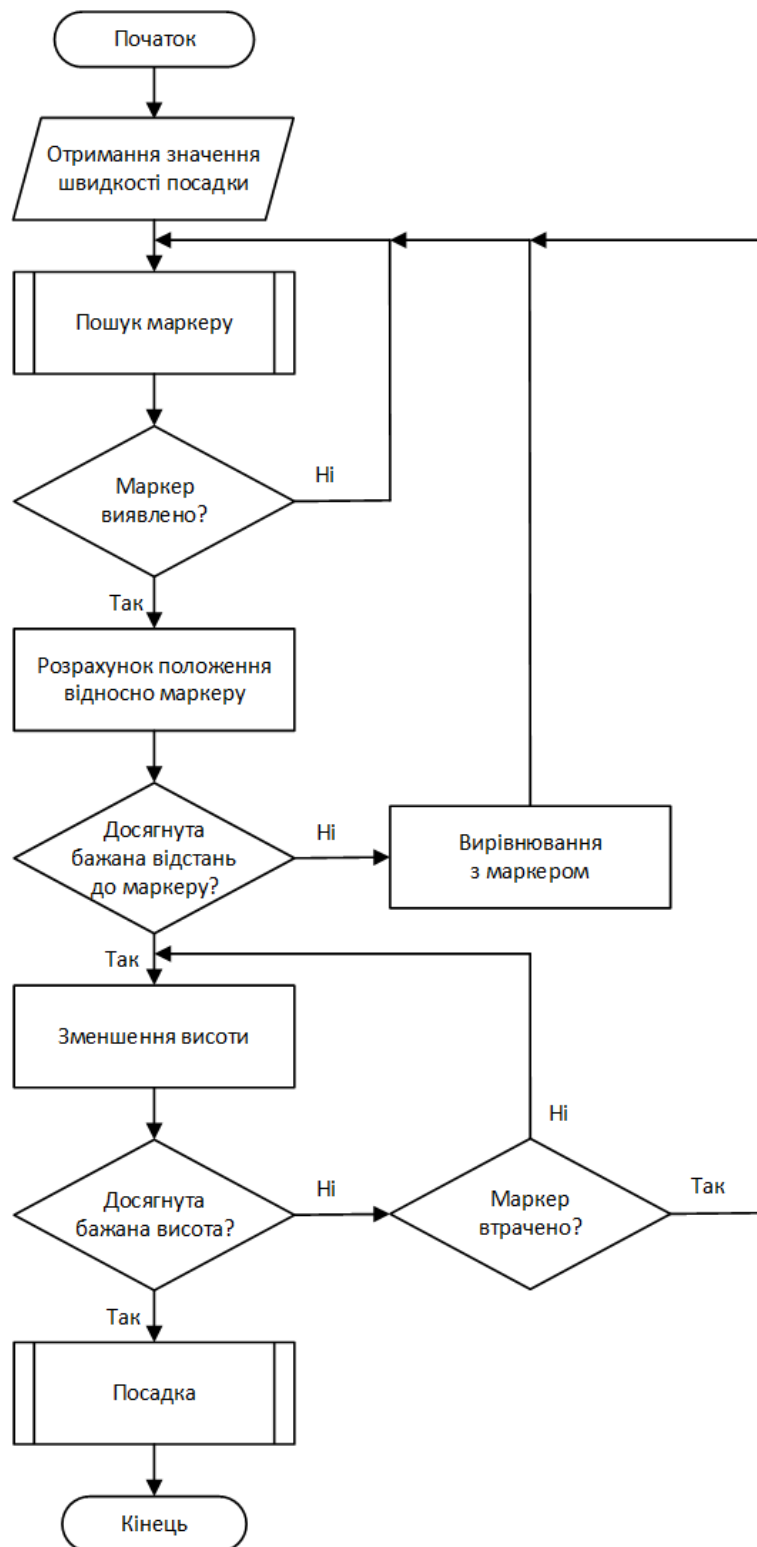


Рисунок Д.1 – Алгоритм автоматичної посадки БПЛА

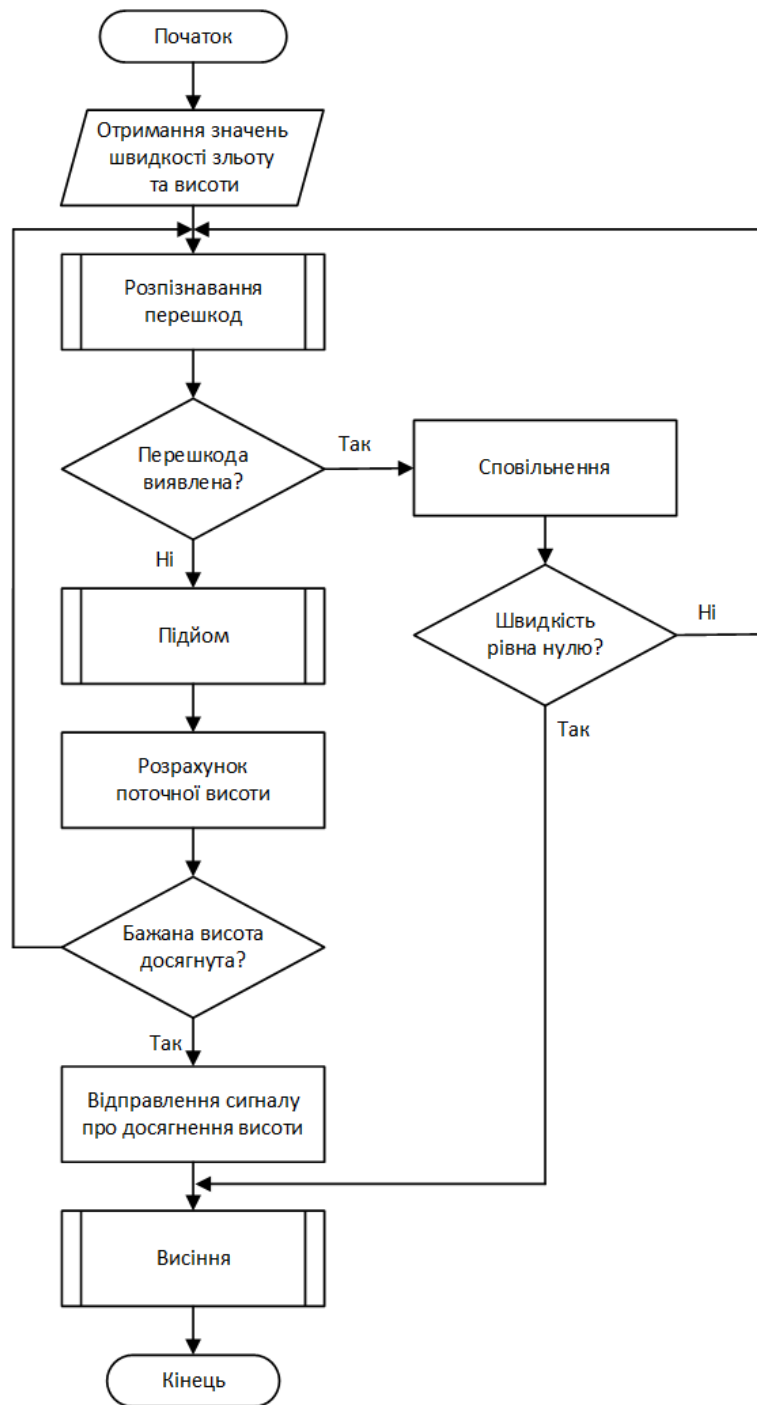


Рисунок Д.2 – Алгоритм автоматичного зльоту пошуково-рятувального БПЛА

ДОДАТОК Е

Алгоритм польоту пошуково-рятувального БПЛА

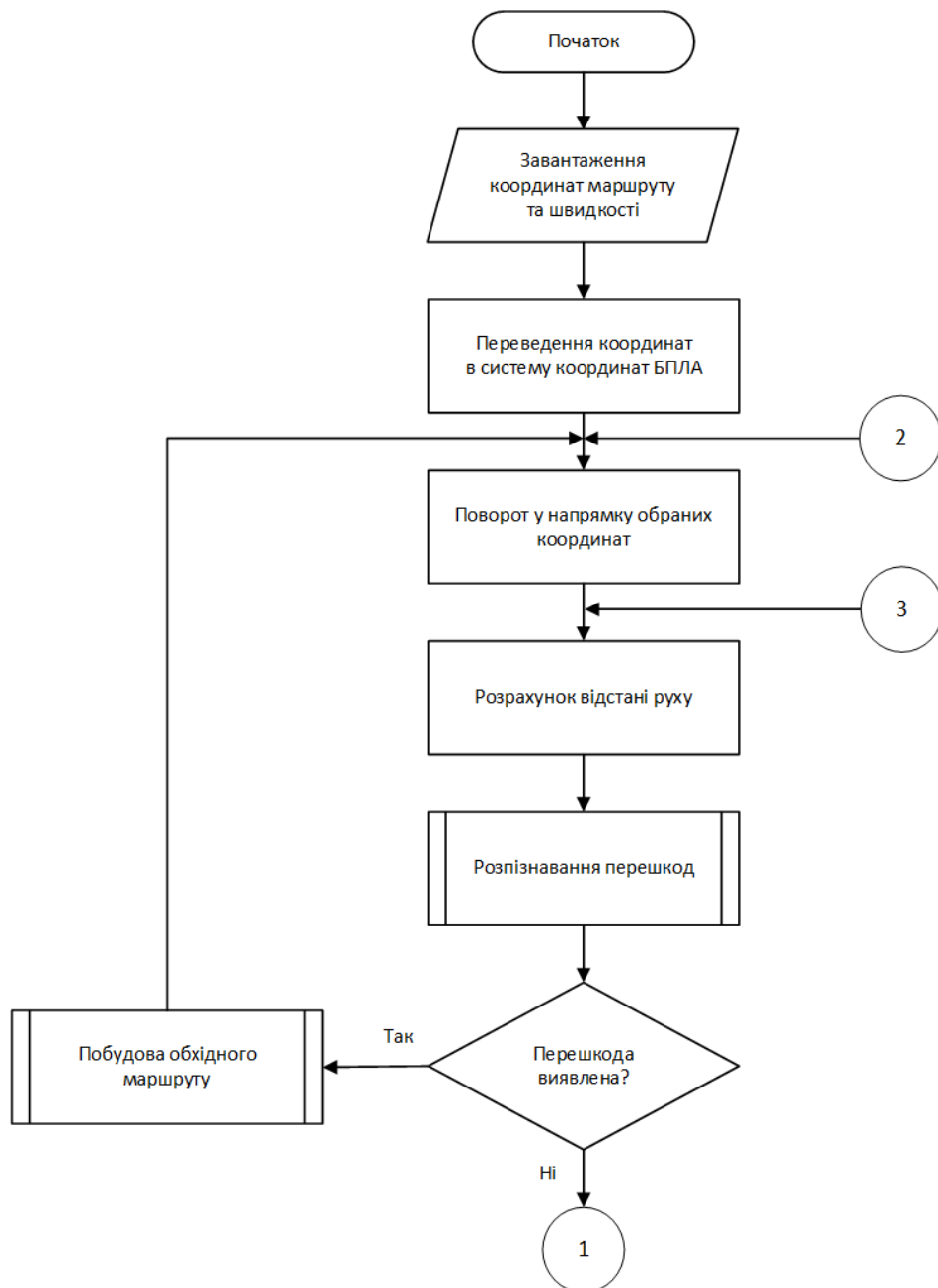
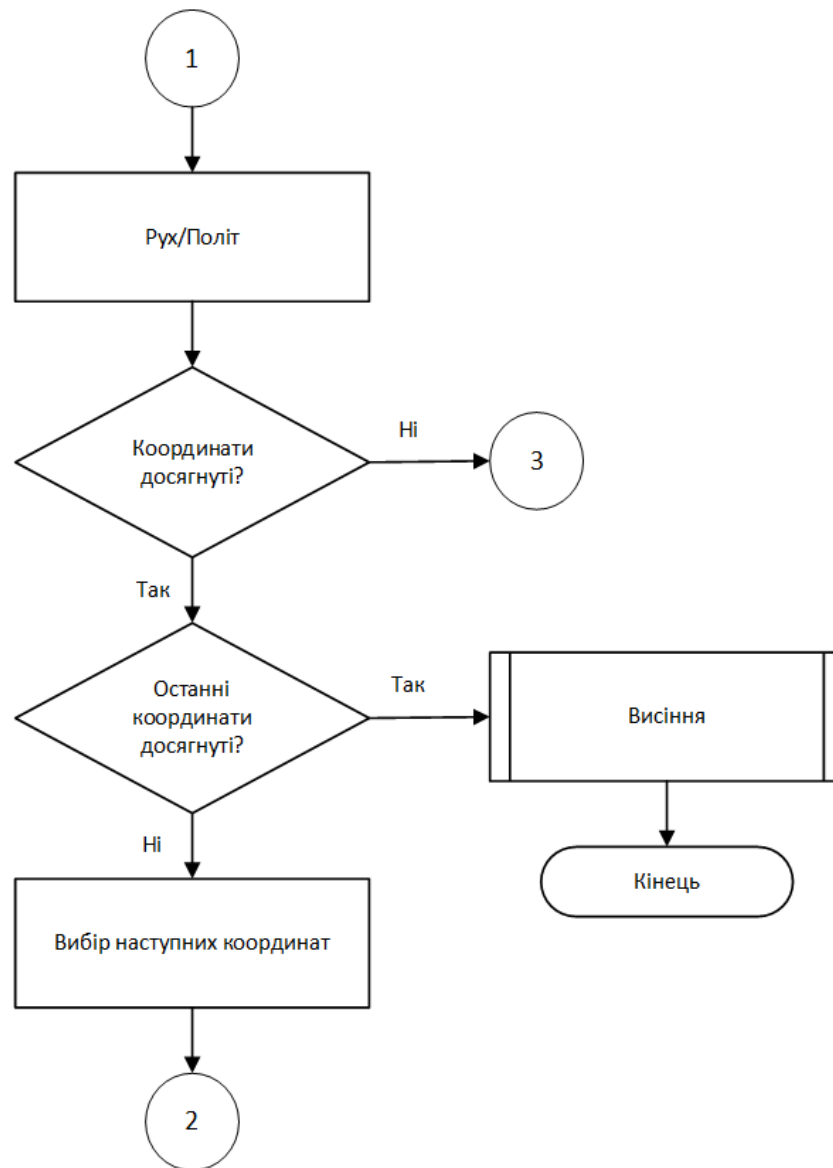


Рисунок Е.1 – Алгоритм польоту пошуково-рятувального БПЛА



Продовження рисунку Е.1 - Алгоритм польоту пошуково-рятувального БПЛА

ДОДАТОК Є

Алгоритм патрулювання пошуково-рятувального БПЛА

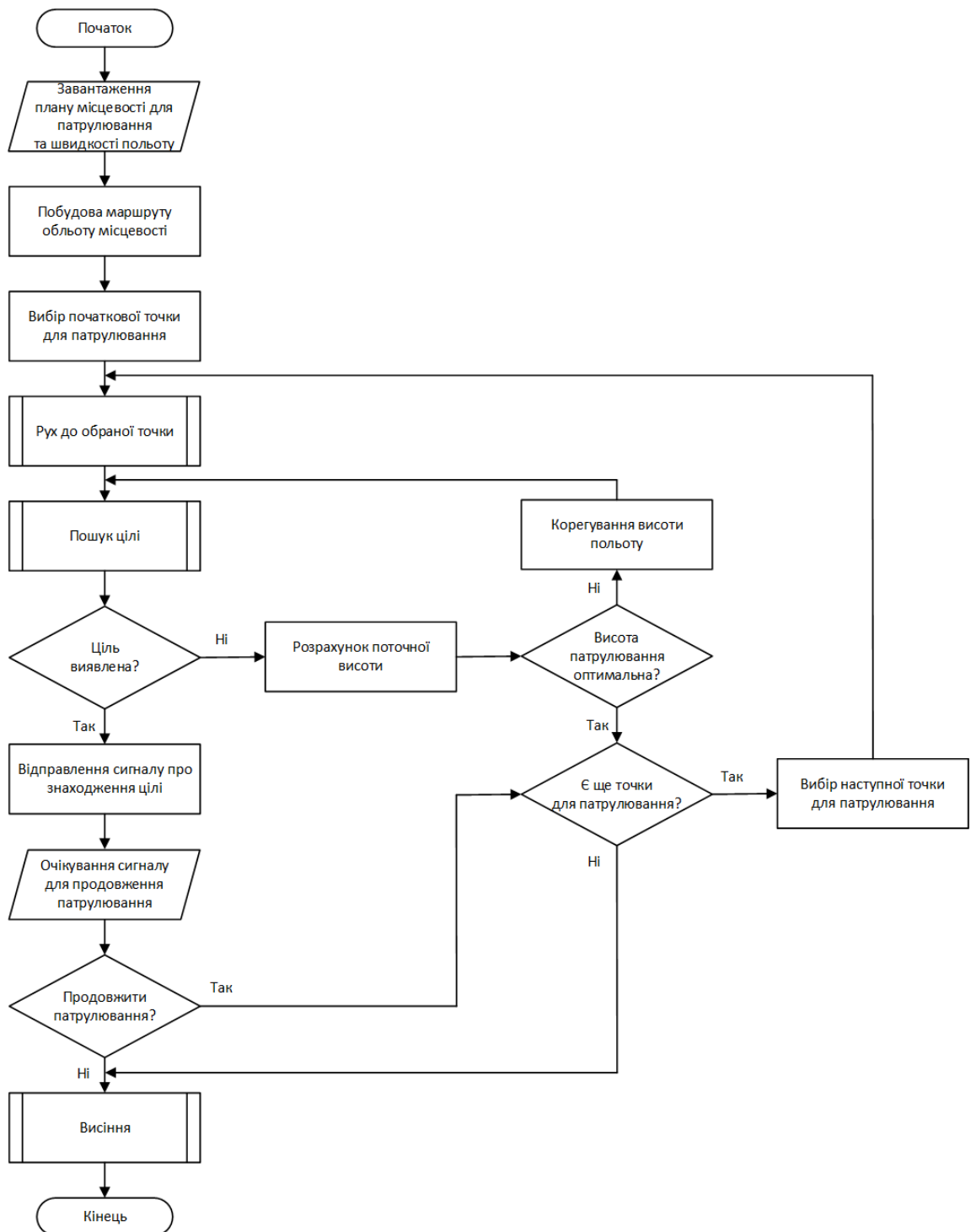


Рисунок Є.1 – Алгоритм патрулювання пошуково-рятувального БПЛА

ДОДАТОК Ж

Розрахунок передавальних функцій приведеної безперервної частини цифрової системи керування пошуково-рятувальним БПЛА.

Формула приведеної безперервної частини цифрової системи:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\}. \quad (\text{Б.1})$$

Далі, використовуючи (Ж.1) та таблицю Z -перетворень, виконаємо перехід до цифрових моделей системи керування пошуково-рятувальним БПЛА, безперервна частина якої описується передавальними функціями:

$$W_x(s) = W_y(s) = \frac{649.7}{s^3(s+0.1736)}; W_z(s) = \frac{0.6944}{s(s+0.1736)};$$
$$W_\varphi(s) = W_\theta(s) = \frac{66.23}{s^2}; W_\psi(s) = \frac{39.53}{s^2}.$$

Проведемо розрахунки для передавальної функції $W_z(s)$, для функцій $W_x(s), W_y(s), W_\varphi(s), W_\theta(s), W_\psi(s)$ дії буду аналогічні.

$$\frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} = \frac{W_z(s)}{s} = \frac{0.6944}{s^2(s+0.1736)} \quad (\text{Ж.2})$$

Розкладемо дріб (Ж.2) на суму простих дробів, застосувавши метод невизначених коефіцієнтів

$$\frac{1}{s^2(s+0.1736)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+0.1736} \quad (\text{Ж.3})$$

$$As(s+0.1736) + B(s+0.1736) + Cs^2 = 1$$

$$As^2 + 0.1736As + Bs + 0.1736B + Cs^2 = 1$$

$$s^2(A+C) + s(0.1736A+B) + 0.1736B = 1$$

$$\begin{cases} A+C=0 \\ 0.1736A+B=0 \\ 0.1736B=1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} A=-33.181847 \\ B=5.76037 \\ C=33.181847 \end{cases} \quad (\text{Ж.4})$$

Підставивши (Ж.3) в (Ж.2), враховуючи знайдені коефіцієнти (Ж.4), отримаємо:

$$\frac{W_z(s)}{s} = 0.6944 \left(\frac{-33.181847}{s} + \frac{5.76037}{s^2} + \frac{33.181847}{s+0.1736} \right) \quad (\text{Ж.5})$$

Скориставшись формулою (Ж.1) для (Ж.5) отримаємо передавальну функцію приведеної безперервної частини для $W_z(s)$ в цифровому вигляді:

$$W_z(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{W_{64}(s)}{s} \right\} = 0.6944 \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{-33.181847}{s} + \frac{5.76037}{s^2} + \frac{33.181847}{s+0.1736} \right\} \quad (\text{Ж.6})$$

Z – перетворення та перетворення Лапласа мають наступну відповідність:

$$\frac{1}{s} \Leftrightarrow \frac{z}{z-1} \quad (\text{Ж.7})$$

$$\frac{1}{s^2} \Leftrightarrow \frac{Tz}{(z-1)^2} \quad (\text{Ж.8})$$

$$\frac{1}{s+\alpha} \Leftrightarrow \frac{z}{z-e^{-\alpha T}} \quad (\text{Ж.9})$$

Підставимо (Ж.7- Ж.9) в (Ж.6), взявши до уваги, що період квантування $T = 0.1\text{с}$.

$$\begin{aligned} W_z(z) &= 0.6944 \frac{z-1}{z} \left(\frac{-33.181847z}{z-1} + \frac{0.576037z}{(z-1)^2} + \frac{33.181847z}{z-e^{-0.01736}} \right) = \\ &= 0.6944 \frac{z-1}{z} \cdot z \left(\frac{-33.181847(z-1)(z-e^{-0.01736})+0.576037(z-e^{-0.01736})+33.181847(z-1)^2}{(z-1)^2(z-e^{-0.01736})} \right) = \\ &= 0.6944 \frac{-33.181847(z-1)(z-0.9828)+0.576037(z-0.9828)+33.181847(z^2-2z+1)}{(z-1)(z-0.9828)} = \\ &= 0.6944 \frac{-33.181847(z^2-1.9828z+0.9828)+0.576037(z-0.9828)+33.181847(z^2-2z+1)}{(z-1)(z-0.9828)} = \\ &= 0.6944 \frac{0.005309z+0.004598}{(z-1)(z-0.9828)} = \frac{0.003686z+0.003192}{z^2-1.9828z+0.9828} \end{aligned}$$

Таким чином, функція приведеної безперервної частини цифрової САУ висотою має вигляд:

$$W_z(z) = \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.9828z + 0.9828}$$

Виконавши операції (Б.2-Б.9) для передавальних функцій $W_x(s), W_y(s), W_\varphi(s), W_\theta(s), W_\psi(s)$ отримаємо їх значення в цифровому вигляді.

$$W_x(z) = W_y(z) = \frac{0.002698z^3 + 0.02957z^2 + 0.02947z + 0.00267}{z^4 - 3.9828z^3 + 5.948z^2 - 3.948z + 0.9828}$$

$$W_\varphi(z) = W_\theta(z) = \frac{0.3311z + 0.3311}{z^2 - 2z + 1}$$

$$W_\psi(z) = \frac{0.1976z + 0.1976}{z^2 - 2z + 1}$$

ДОДАТОК 3

Розрахунок характеристичного рівняння $D(w)$ для дослідження системи керування пошуково-рятувального БПЛА на стійкість за допомогою критерію Гурвіца

Характеристичні рівняння $D(z)$ мають вигляд:

$$D_z(z) = z^2 - 1.97911z + 0.985992 \quad (3.1)$$

$$D_x(z) = D_y(z) = z^4 - 3.9801z^3 + 5.94887z^2 - 3.91853z + 0.98547 \quad (3.2)$$

$$D_\varphi(z) = D_\theta(z) = z^2 - 1.6689z + 1.3311 \quad (3.3)$$

$$D_\psi(z) = z^2 - 1.8024z + 1.1976 \quad (3.4)$$

Виконаємо підстановку $z = \frac{1+w}{1-w}$ та знайдемо характеристичні рівняння $D(w)$ для кожного виразу (3.1- 3.4).

$$\begin{aligned} D_z(w) &= \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 - 1.97911\left(\frac{1+w}{1-w}\right) + 0.985992 = \\ &= \frac{(1+w)^2 - 1.97911(1+w)(1-w) + 0.985992(1-w)^2}{(1-w)^2} = \\ &= \frac{w^2 + 2w + 1 - 1.97911(1-w^2) + 0.985992(w^2 - 2w + 1)}{(1-w)^2} = \\ &= \frac{w^2(1 + 1.97911 + 0.985992) + w(2 - 1.971984) + (1 - 1.97911 + 0.985992)}{(1-w)^2} = \\ &= \frac{3.965102w^2 + 0.028016w + 0.006882}{(1-w)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_x(w) &= D_y(w) = \\ &= \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^4 - 3.9801\left(\frac{1+w}{1-w}\right)^3 + 5.94887\left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 - 3.91853\left(\frac{1+w}{1-w}\right) + 0.98547 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(1+w)^4}{(1-w)^4} - \frac{3.9801(1+w)^3(1-w)}{(1-w)^4} + \frac{5.948879(1-w)^2(1+w)^2}{(1-w)^4} \\
&+ \frac{-3.91853(1+w)(1-w)^2}{(1-w)^4} + \frac{0.98547(1+w)^4}{(1-w)^4} = \\
&= \frac{15.833w^4 + 0.18126w^3 + 0.01508w^2 - 0.06502w + 0.03571}{(1-w)^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_\varphi(w) = D_\theta(w) &= \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 - 1.6689\left(\frac{1+w}{1-w}\right) + 1.3311 = \\
&= \frac{(1+w)^2 - 1.6689(1+w)(1-w) + 1.3311(1-w)^2}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{w^2 + 2w + 1 - 1.6689(1-w^2) + 1.3311(w^2 - 2w + 1)}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{w^2(1 + 1.6689 + 1.3311) + w(2 - 2.6622) + (1 - 1.6689 + 1.3311)}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{4w^2 - 0.6622w + 0.6622}{(1-w)^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_\psi(z) &= \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 - 1.8024\left(\frac{1+w}{1-w}\right) + 1.1976 = \\
&= \frac{(1+w)^2 - 1.8024(1+w)(1-w) + 1.1976(1-w)^2}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{w^2 + 2w + 1 - 1.8024(1-w^2) + 1.1976(w^2 - 2w + 1)}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{w^2(1 + 1.8024 + 1.1976) + w(2 - 2.3952) + (1 - 1.8024 + 1.1976)}{(1-w)^2} = \\
&= \frac{4w^2 - 0.3952w + 0.3952}{(1-w)^2}
\end{aligned}$$

Таким чином, характеристичні рівняння замкненої системи керування пошуково-рятувальним БПЛА після білінійного перетворення матимуть вигляд:

$$D_z(w) = \frac{3.965102w^2 + 0.028016w + 0.006882}{(1-w)^2} \quad (3.5)$$

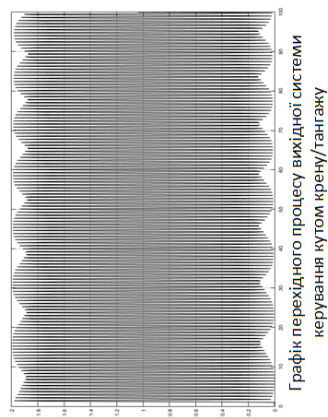
$$D_x(w) = D_y(z) = \frac{15.833w^4+0.18126w^3+0.01508w^2-0.06502w+0.03571}{(1-w)^2} \quad (3.6)$$

$$D_\varphi(w) = D_\theta(z) = \frac{4w^2-0.6622w+0.6622}{(1-w)^2} \quad (3.7)$$

$$D_\psi w = \frac{4w^2-0.3952w+0.3952}{(1-w)^2} \quad (3.8)$$

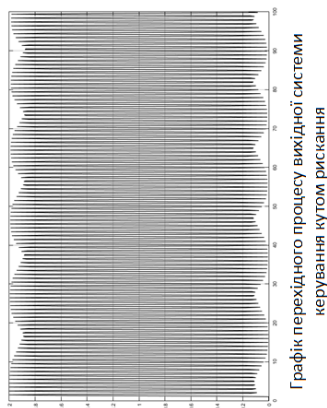
ДОДАТОК И

Математична модель системи керування пошуково-рятувальним БПЛА



Система рівнянь, що описує математичну модель безпілотного літального апарату

$$\begin{cases} \ddot{x} = (C_\psi S_\phi C_\theta + S_\psi S_\phi) \frac{T}{m} - \frac{A_z}{m} \dot{x} \\ \dot{y} = (S_\psi S_\phi C_\theta + C_\psi S_\phi) \frac{T}{m} - \frac{A_z}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = C_\phi C_\theta \frac{T}{m} - g - \frac{A_z}{m} \ddot{z} \\ \dot{\phi} = \frac{1}{J_x} \tau_\phi \\ \dot{\theta} = \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \dot{\psi} = \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{cases}$$



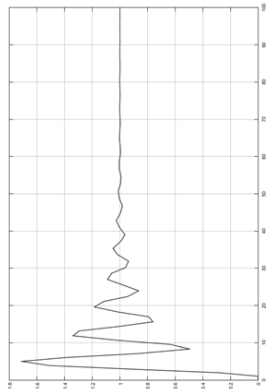
Після лінеаризації та розбиття системи отримали незалежні системи рівнянь для керування безпілотним літальним апаратом

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \phi_2 = \frac{1}{J_x} u_{\phi\phi} \end{cases} \quad y = \phi_1$$

Математична модель системи керування кутом крену

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_2 \\ \psi_2 = \frac{1}{J_z} u_{\psi\psi} \end{cases} \quad y = \psi_1$$

Математична модель системи керування кутом рихання



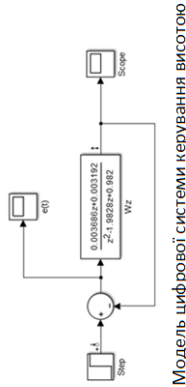
Графік перехідного процесу вихідної системи керування кутом висотою

```
1 m = 1.44;
2 g = 9.81;
3 A_x = 0.0285; A_y = 0.0285; A_z = 0.0285;
4 A_phi = 0.0285; A_theta = 0.0285; A_psi = 0.0285;
5 I_x = 0.0312; I_y = 0.0312; I_z = 0.0312;
6
7 A_x = [0 1 0 0 0 -2A_x/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
8 A_y = [0 1 0 0 0 -2A_y/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
9 A_z = [0 1 0 0 0 -2A_z/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
10 A_phi = [0 1 0 0 0 -2A_phi/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
11 A_theta = [0 1 0 0 0 -2A_theta/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
12 A_psi = [0 1 0 0 0 -2A_psi/m 0 0 0 0 1 0 0 0 0];
13
14 B_x = [0 0 0 0 1/T_x];
15 B_y = [0 0 0 0 1/T_y];
16 B_z = [0 0 0 0 1/T_z];
17 B_phi = [0 0 0 0 1/T_phi];
18 B_theta = [0 0 0 0 1/T_theta];
19 B_psi = [0 0 0 0 1/T_psi];
20
21 C_x = [1 0 0 0 0];
22 C_y = [1 0 0 0 0];
23 C_z = [1 0 0 0 0];
24 C_phi = [1 0 0];
25 C_theta = [1 0 0];
26 C_psi = [1 0 0];
27
28 S_x = ss(A_x, B_x, C_x, 0);
29 S_y = ss(A_y, B_y, C_y, 0);
30 S_z = ss(A_z, B_z, C_z, 0);
31 S_phi = ss(A_phi, B_phi, C_phi, 0);
32 S_theta = ss(A_theta, B_theta, C_theta, 0);
33 S_psi = ss(A_psi, B_psi, C_psi, 0);
34
35 Mx = tf(S_x);
36 My = tf(S_y);
37 Mz = tf(S_z);
38 Mphi = tf(S_phi);
39 Mtheta = tf(S_theta);
40 Mpsi = tf(S_psi);
```

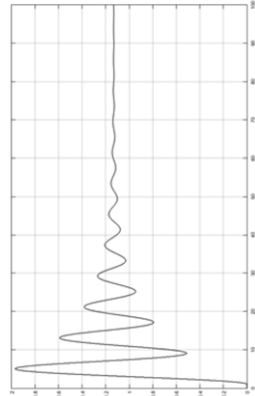
Розрахунок передавальних функцій системи керування БПЛА

ДОДАТОК І

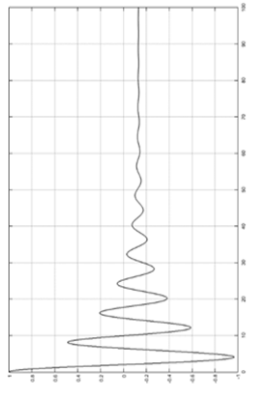
Модель вихідної системи керування пошуково-рятувальним БПЛА



Модель цифрової системи керування висотою



Графік перехідного процесу цифрової системи керування висотою



Графік похибки цифрової системи керування висотою

$$W_z(z) = \frac{0.003452z + 0.003432}{z^2 - 1.9828z + 0.985992}$$

Передавальна функція цифрової системи керування висотою

$$W_z(z) = \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.97911z + 0.985992}$$

Передавальна функція замкненої цифрової системи керування висотою

Перевірка системи керування висотою на стійкість за загальним алгоритмом

$$D(z) = z^2 - 1.97911z + 0.985992 \quad \text{- характеристичний поліном}$$

$$z_{1,2} = 0.989555 \pm 0.0822855j \quad \text{- корені характеристичного поліному}$$

$$\sqrt{0.989555^2 + 0.0822855^2} = 0.99297 < 1 \quad \text{- умова стійкості системи}$$

Обчислене значення менше одиниці, тобто корені характеристичного рівняння лежать в межах кола з одиничним радіусом, що свідчить про стійкість системи.

Розрахунок сталої похибки системи керування висотою

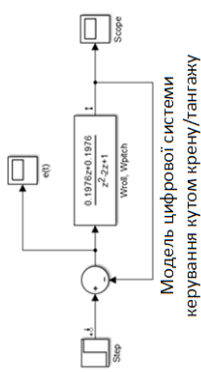
$$\varepsilon_{em} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)E(z)$$

$$E(z) = \Xi(z) (1 - W_{an}(z)) \quad \text{- Z-перетворення похибки}$$

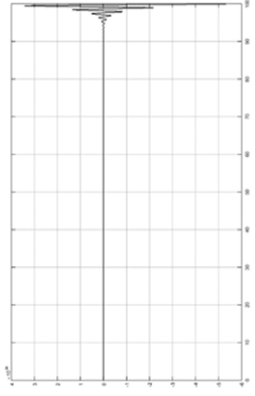
$$\xi(t) = 1(t); \Xi(z) = Z\{1(t)\} = \frac{z}{z-1} \quad \text{- Z-перетворення одиничного стрибка}$$

$$E(z) = \frac{z}{z-1} \left(\frac{1 - \frac{0.003686z + 0.003192}{z^2 - 1.97911z + 0.985992}}{z-1} \right) = \frac{z^3 - 1.9828z^2 + 0.9828z}{(z-1)(z^2 - 1.97911z + 0.985992)} = \frac{z^3 - 0.9828z}{z^3 - 1.97911z + 0.985992}$$

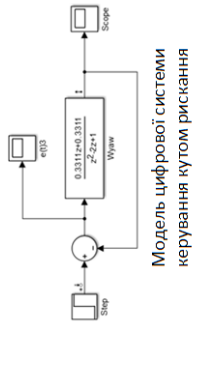
$$\varepsilon_{em} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^3 - 0.9828z}{z^3 - 1.97911z + 0.985992} = 0 \cdot \frac{1 - 0.9828}{1 - 1.97911 + 0.985992} = 0$$



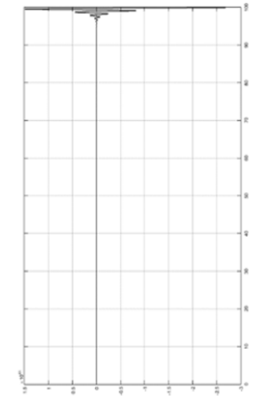
Модель цифрової системи керування кутом крену/тангажу



Графік перехідного процесу цифрової системи керування кутом крену/тангажу



Модель цифрової системи керування кутом роллю

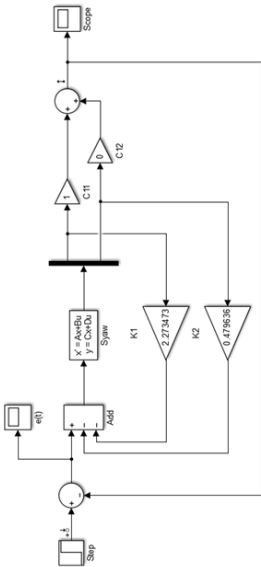


Графік перехідного процесу цифрової системи керування кутом роллю

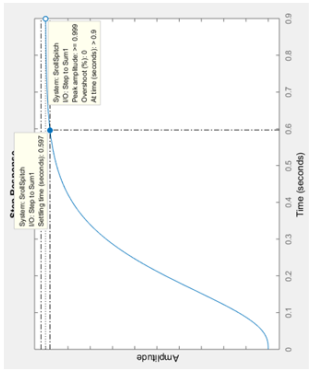
Показники якості цифрових системи керування кутами				
Передавальна функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Час встановлення, с	Стала похибка
$W_z(z)$	74	52,5	2,2	0,13
$W_y(z)$	Нестійка			
$W_\phi(z)$	Нестійка			
$W_\psi(z)$	Нестійка			

ДОДАТОК І

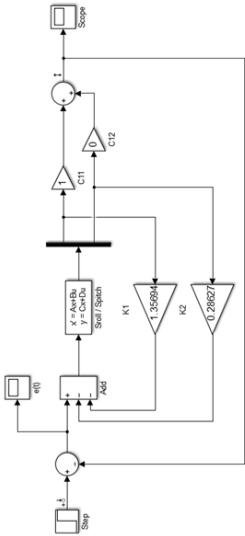
Модель системи керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модальним регулятором



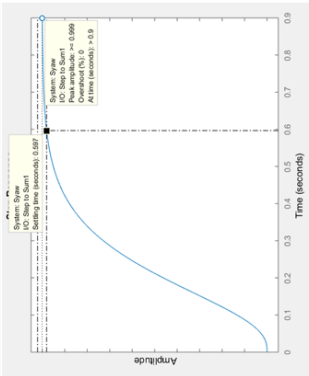
Модель системи керування кутом ризику з модальним регулятором



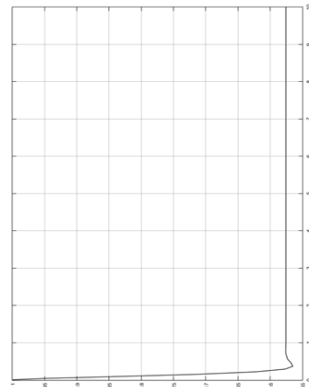
Графік похибки системи керування кутом ризику з модальним регулятором



Модель системи керування кутом крену/тангажу з модальним регулятором



Графік перехідного процесу системи керування кутом крену/тангажу з модальним регулятором

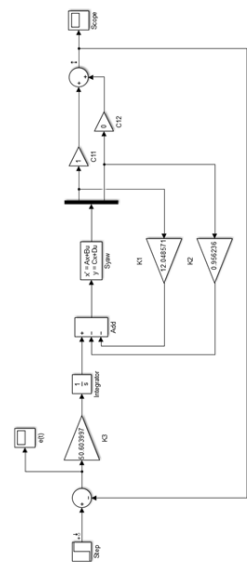


Графік похибки системи керування кутом крену/тангажу з модальним регулятором

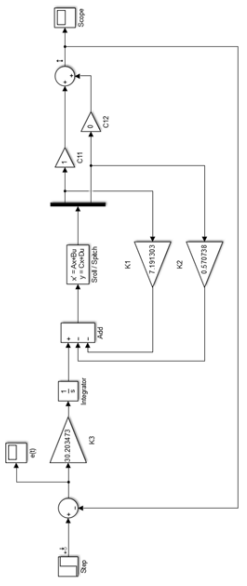
Показники якості системи керування кутами			
Передавальн функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Стала похибка
$W_{\varphi}(z)$	0	1,2	0,56
$W_{\theta}(z)$	0	1,2	0,263
$W_{\psi}(z)$	0	1,2	0,263

ДОДАТОК К

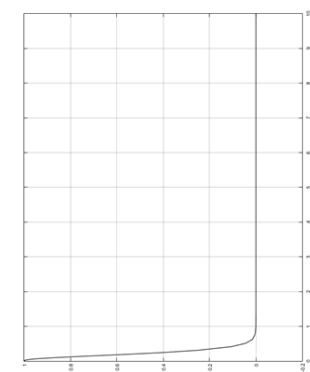
Модель системи керування кутами пошуково-рятувального БПЛА з модифікованим модальним регулятором



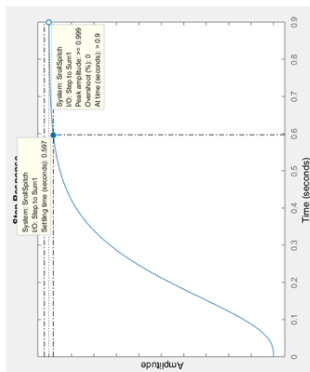
Модель системи керування кутом ристання з модифікованим модальним регулятором



Модель системи керування кутом крену/тангажу з модифікованим модальним регулятором



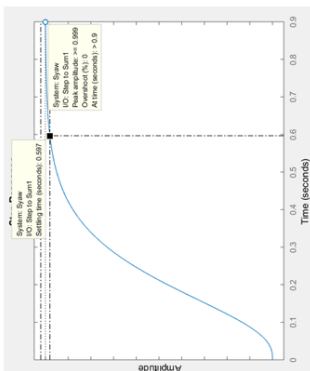
Графік похибки системи керування кутом ристання з модифікованим модальним регулятором



Графік перехідного процесу системи керування кутом ристання з модифікованим модальним регулятором



Графік похибки системи керування кутом крену/тангажу з модифікованим модальним регулятором

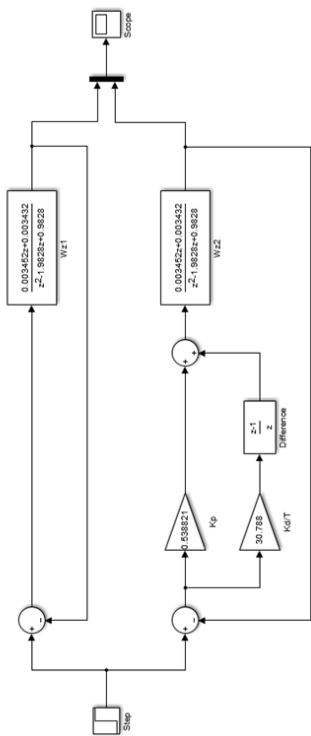
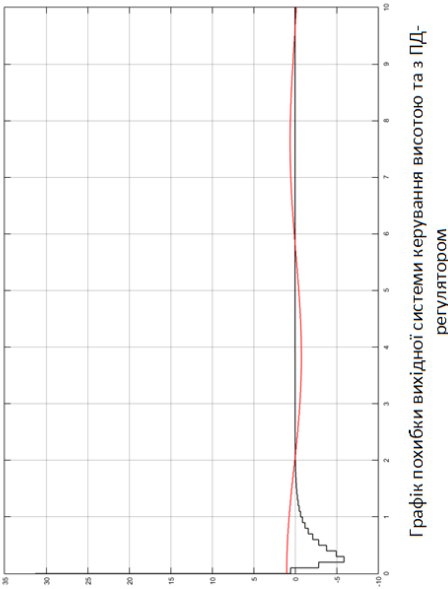
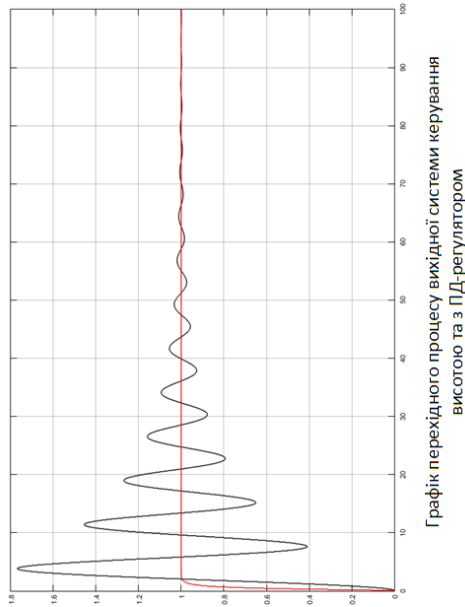


Графік перехідного процесу системи керування кутом крену/тангажу з модифікованим модальним регулятором

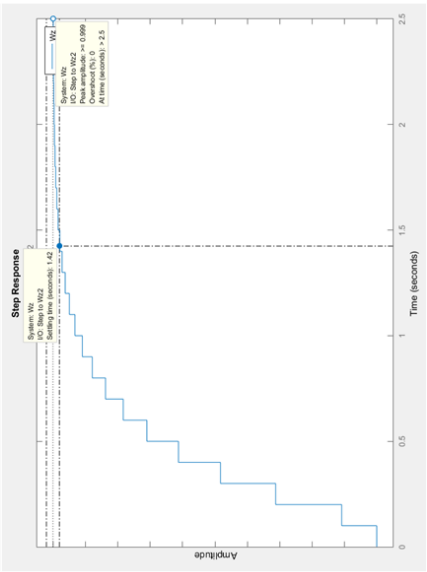
Показники якості системи керування кутами			
Передавальн функція	Перерегулювання, %	Час регулювання, с	Стала похибка
$W_p(z)$	0	1	0,597
$W_e(z)$	0	1	0,597
$W_\phi(z)$	0	1	0,597

ДОДАТОК Л

Модель системи керування висотою пошуково-рятувального БПЛА з ПД-регулятором



Модель вихідної системи керування висотою та з ПД-регулятором



Графік перехідного процесу системи керування висотою з ПД-регулятором та показниками якості

Показники якості системи керування висотою	
Перерегулювання, %	0
Час регулювання, с	2,5
Час встановлення, с	1,42
Стала похибка	0